This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Informazioni su questo libro

Si tratta della copia digitale di un libro che per generazioni è stato conservata negli scaffali di una biblioteca prima di essere digitalizzato da Google nell'ambito del progetto volto a rendere disponibili online i libri di tutto il mondo.

Ha sopravvissuto abbastanza per non essere più protetto dai diritti di copyright e diventare di pubblico dominio. Un libro di pubblico dominio è un libro che non è mai stato protetto dal copyright o i cui termini legali di copyright sono scaduti. La classificazione di un libro come di pubblico dominio può variare da paese a paese. I libri di pubblico dominio sono l'anello di congiunzione con il passato, rappresentano un patrimonio storico, culturale e di conoscenza spesso difficile da scoprire.

Commenti, note e altre annotazioni a margine presenti nel volume originale compariranno in questo file, come testimonianza del lungo viaggio percorso dal libro, dall'editore originale alla biblioteca, per giungere fino a te.

Linee guide per l'utilizzo

Google è orgoglioso di essere il partner delle biblioteche per digitalizzare i materiali di pubblico dominio e renderli universalmente disponibili. I libri di pubblico dominio appartengono al pubblico e noi ne siamo solamente i custodi. Tuttavia questo lavoro è oneroso, pertanto, per poter continuare ad offrire questo servizio abbiamo preso alcune iniziative per impedire l'utilizzo illecito da parte di soggetti commerciali, compresa l'imposizione di restrizioni sull'invio di query automatizzate.

Inoltre ti chiediamo di:

+ *Non fare un uso commerciale di questi file* Abbiamo concepito Google Ricerca Libri per l'uso da parte dei singoli utenti privati e ti chiediamo di utilizzare questi file per uso personale e non a fini commerciali.

+ *Non inviare query automatizzate* Non inviare a Google query automatizzate di alcun tipo. Se stai effettuando delle ricerche nel campo della traduzione automatica, del riconoscimento ottico dei caratteri (OCR) o in altri campi dove necessiti di utilizzare grandi quantità di testo, ti invitiamo a contattarci. Incoraggiamo l'uso dei materiali di pubblico dominio per questi scopi e potremmo esserti di aiuto.

+ *Conserva la filigrana* La "filigrana" (watermark) di Google che compare in ciascun file è essenziale per informare gli utenti su questo progetto e aiutarli a trovare materiali aggiuntivi tramite Google Ricerca Libri. Non rimuoverla.

+ *Fanne un uso legale* Indipendentemente dall'utilizzo che ne farai, ricordati che è tua responsabilità accertati di farne un uso legale. Non dare per scontato che, poiché un libro è di pubblico dominio per gli utenti degli Stati Uniti, sia di pubblico dominio anche per gli utenti di altri paesi. I criteri che stabiliscono se un libro è protetto da copyright variano da Paese a Paese e non possiamo offrire indicazioni se un determinato uso del libro è consentito. Non dare per scontato che poiché un libro compare in Google Ricerca Libri ciò significhi che può essere utilizzato in qualsiasi modo e in qualsiasi Paese del mondo. Le sanzioni per le violazioni del copyright possono essere molto severe.

Informazioni su Google Ricerca Libri

La missione di Google è organizzare le informazioni a livello mondiale e renderle universalmente accessibili e fruibili. Google Ricerca Libri aiuta i lettori a scoprire i libri di tutto il mondo e consente ad autori ed editori di raggiungere un pubblico più ampio. Puoi effettuare una ricerca sul Web nell'intero testo di questo libro da `http://books.google.com`

S 193.2

HARVARD COLLEGE LIBRARY

BOUGHT FROM THE INCOME OF THE FUND
BEQUEATHED BY
PETER PAUL FRANCIS DEGRAND
(1787–1855)
OF BOSTON

FOR FRENCH WORKS AND PERIODICALS ON THE EXACT SCIENCES
AND ON CHEMISTRY, ASTRONOMY AND OTHER SCIENCES
APPLIED TO THE ARTS AND TO NAVIGATION

PAUL DE SAINT-ROBERT.

MÉMOIRES SCIENTIFIQUES,

RÉUNIS ET MIS EN ORDRE.

TOME II.

ARTILLERIE.

TURIN,

VINCENT BONA, IMPRIMEUR DE S. M.,

Rue de l'Hôpital, N° 3.

1873.

MÉMOIRES SCIENTIFIQUES.

Tome II.

ARTILLERIE.

PAUL DE SAINT-ROBERT.

MÉMOIRES SCIENTIFIQUES,

RÉUNIS ET MIS EN ORDRE.

TOME II.

ARTILLERIE.

TURIN,

VINCENT BONA, IMPRIMEUR DE S. M.,

Rue de l'Hôpital, N° 3.

1873.

S 193.2

HARVARD COLLEGE LIBRARY
DEGRAND FUND
Dec. 5, 1924

AVERTISSEMENT.

Ainsi que j'en avais annoncé le dessein, je continue dans ce volume à réimprimer en français les mémoires que j'ai publiés à différentes époques, soit en français, soit en italien. Je reproduis ici, en les partageant en cinq groupes, ceux de mes mémoires qui sont relatifs à l'Artillerie.

Le premier groupe comprend deux mémoires se rapportant à une proposition que j'ai mise en avant, il y a plus de quinze ans : celle d'un projectile aplati avec son axe de figure perpendiculaire au plan de projection, et tournant sur cet axe au rebours d'une roue de voiture.

Aux yeux de quelques-uns cette idée parut une énormité. D'autres, plus bienveillants, la considérèrent

comme un rêve scientifique appelé à ne jamais avoir un succès pratique. Enfin, un petit nombre de personnes trouva ma conception heureuse, mais d'une application difficile. Parmi ces derniers je me plais à citer le général prussien, M. Otto, bien connu par ses travaux sur la balistique, qui m'écrivait en 1859 : « Quant à moi, je vous assure que votre idée m'a « ravi. De toutes les formes de projectiles praticables, « celle que vous suggérez est la plus parfaite. Théo- « riquement, on ne saurait apprécier au juste la « valeur pratique de votre idée : il faut pour cela « recourir à l'épreuve, mais à une épreuve sérieuse « où rien ne soit négligé de ce qui peut contribuer « à la réussite. » [1]

De ces trois catégories de personnes laquelle a raison ? Le temps prononcera. Ce qui est, dès à présent, hors de doute, c'est la longueur étonnante

---

(1) « *Was meine Person anbetrifft, so kann ich in Wahrheit sagen, dass Ihr Einfall mich entzückt hat. Derselbe schliesst den Cyklus der logisch und praktisch anwendbaren Kathegorien von Geschossformen ab, und ist in sofern klassisch, mustergiltig. Sein praktischer Werth kann durchaus nicht vom rein spekulativen Standpunkte aus beurtheilt werden, sondern nur durch einen praktischen Versuch, bei welchem zugleich Pietät genug mitgebracht wird, um diejenigen Modificationen nicht unversucht zu lassen, welche die praktische Verwirklichung nothwendig fordert.* »

des portées que fournissent les projectiles lenticulaires. En effet, partout où l'on a essayé de ces projectiles, ils ont donné des portées plus longues que si on les avait lancés dans le vide avec la même vitesse initiale et le même angle de projection. Le mouvement de rotation de bas en haut, dans la partie antérieure du projectile, fait naître de la part de l'air atmosphérique une pression qui agit de bas en haut sur le projectile et lui donne, pour ainsi dire, des ailes pour se soutenir dans l'air. Grâce à ce tir tendu et, par suite, au grand espace où le projectile se conserve à une hauteur ne dépassant pas les objets à battre, on peut s'attendre à ce que, sur le champ de bataille, les projectiles lenticulaires l'emporteront sur d'autres genres de projectiles qui, tout en ayant une plus grande justesse de tir, auraient un angle de chute plus fort; car à la guerre le but à atteindre a toujours une certaine étendue.

Le deuxième groupe de mémoires en renferme quatre se rapportant à la poudre. Dans le premier, écrit en 1852, je combats le procédé des pilons qui était alors adopté à l'exclusion de tout autre en Piémont.

Je me permettrai d'appeler l'attention du lecteur

sur le dernier mémoire de ce groupe. L'influence bien marquée de la pression sur la durée de combustion de la matière de la poudre doit démontrer aux artilleurs la nécessité de reviser les théories de Piobert sur la combustion de la poudre, qui ont généralement cours aujourd'hui.

Le troisième groupe se compose d'un seul mémoire que j'ai extrait de mes *Principes de Thermodynamique*, en y ajoutant quelques développements destinés à le rendre indépendant des matières qui l'accompagnent dans ce livre. C'est une solution entièrement nouvelle du problème principal de la Balistique intérieure. Elle laisse beaucoup à désirer, mais c'est un premier pas dans une route bien plus rationnelle que celle qu'on a suivie jusqu'ici.

Le quatrième se compose d'un mémoire ayant pour but d'exposer d'une manière élémentaire la théorie du tir des armes à feu. Dans la quatrième partie de ce mémoire, on remarquera la confutation que je donne de quelques-uns des préjugés en fait de tir, qui sont accrédités chez nombre de personnes. C'est un sujet qui n'avait pas été, que je sache, abordé avant moi. On trouvera dans une note, à la fin de ce mémoire, la détermination des limites de l'erreur

à craindre lorsqu'on admet comme exact le principe que l'abaissement d'un projectile sphérique, au-dessous de la ligne de projection, est indépendant de l'angle de projection.

Le cinquième groupe enfin ne renferme qu'une courte note sur la manière de déterminer le volume d'une embrasure.

Il me reste à adresser de bien vifs remercîments à M. Gilbert Govi, de l'Académie des sciences de Turin, et à M. Ellena, capitaine d'artillerie, qui m'ont gracieusement prêté leur secours dans la tâche peu attrayante de la correction des épreuves.

Turin, avril 1873.

PAUL DE SAINT-ROBERT.

PROJECTILES LENTICULAIRES.

PRÉFACE

L'idée d'une arme, destinée à lancer un projectile lenticulaire se présenta à mon esprit en 1856, et fut publiée par moi l'année suivante dans une brochure en langue italienne (*). La même année ayant quitté le service militaire, il m'a été impossible de poursuivre la réalisation pratique de mon idée.

Vers la même époque M. de Puydt, capitaine commandant de l'artillerie belge, fit une proposition analogue d'un projectile discoïde excentrique (**). Les expériences auxquelles on soumit ce système furent trop peu nombreuses pour qu'on en pût tirer une conclusion, et je ne crois pas qu'on

(*) *Nuovo proietto e nuova arma da fuoco* di PAOLO DI ST.-ROBERT, *luogotenente colonnello d'artiglieria*. Torino, Stamperia Reale, 1857.

(**) *Nouvelle application du principe de l'excentricité aux projectiles: Disques excentriques, tirés dans des bouches à feu à âme elliptique.* Par le capitaine commandant G. de Puydt, de l'artillerie belge. Imprimé dans la *Revue de Technologie militaire* par L. Delobel, tome II, 1857. Paris et Liége, E. Noblet, éditeur, page 547.

y ait donné suite. On essaya des disques excentriques de plusieurs modèles très-différents, qui donnèrent tous de grandes déviations latérales et des portées irrégulières, mais en général très-grandes, sous l'angle de projection d'un degré.

En 1861, M. de Puydt, avec une générosité bien rare chez un inventeur, voulut concourir à la réussite de mon système, en m'envoyant un projet sur la manière de forer des canons courbes. Je fus touché de ce trait de camaraderie internationale et de solidarité scientifique. Malheureusement ce projet n'agréa point à la Direction de la Fonderie de l'Arsenal de Turin, et depuis lors, il ne fut plus question de canons courbes, jusqu'à ces derniers temps où j'ai appris qu'on venait de construire en Russie un canon de mon système, et qu'on était en train de l'expérimenter.

Un général d'artillerie, qui s'est constamment opposé à l'essai des projectiles lenticulaires, en les déclarant fondés sur des principes erronés, m'a accusé à plusieurs reprises d'avoir, par mon invention, empêché, qu'on adoptât en 1848 son système de canons rayés, se chargeant par la culasse, et d'avoir, par là, contribué à la malheureuse réussite de la guerre d'indépendance du Piémont contre l'Autriche. A l'entendre, si le Piémont avait adopté, en 1848, son système de canons rayés, la campagne aurait eu une tout autre issue, et le mot de Charles-Albert: *L'Italia farà da sè* aurait été réalisé.

Je laisse au lecteur le soin d'apprécier de pareilles allégations ; quant à moi, je me bornerai à faire remarquer que ma proposition des projectiles lenticulaires, bonne ou mauvaise qu'elle puisse être, est bien innocente du malheureux résultat de la campagne de 1848, puisqu'elle n'a été faite que neuf ans plus tard, c'est-à-dire en 1857, à la veille du jour où je quittai l'artillerie ; et que cette conception théorique n'est entrée dans la voie d'une expérimentation sérieuse que tout récemment, à l'autre extrémité de l'Europe, en Russie.

Mon attention ayant été ramenée sur les projectiles lenticulaires à l'occasion de la réimpression des deux mémoires suivants qui s'y rapportent, j'ai imaginé un nouveau moyen pour imprimer le mouvement de rotation au projectile, moyen qui pourrait, si je ne me trompe, faciliter beaucoup l'exécution pratique des canons à projectiles lenticulaires. On le trouvera exposé, dans une *addition*, à la suite de mes deux anciens mémoires.

Turin, janvier 1873.

NOUVEAU PROJECTILE

ET

NOUVELLE ARME A FEU (*)

Les déviations qu'on observe dans le tir des projectiles proviennent principalement du mouvement de rotation qui en accompagne presque toujours le mouvement de translation. La rotation est due, soit à des causes qui s'exercent sur le projectile à l'intérieur de l'âme de l'arme, soit à des causes qui agissent sur lui durant son trajet dans l'air. Il faut compter parmi les premières : le frottement du projectile contre la paroi inférieure de l'âme, ses battements, la non-coïncidence des centres de gravité et de figure, etc., et parmi les dernières : la non-symétrie de l'action que la résistance de l'air exerce sur le mobile pendant qu'il se meut dans ce milieu fluide provenant de l'irrégularité de forme de ce mobile, ou de la non-homogénéité de sa matière, etc.

(*) Publié pour la première fois en langue italienne, en 1857, à Turin. Traduit en français par M. le lieutenant-colonel Dolobel dans la *Revue de Technologie militaire*, tome II, p. 588. Traduit en allemand par M. le colonel Otto dans le journal prussien : *Archiv für die Offiziere der Königlich Preussischen Artillerie und Ingenieur-Corps*, t. 46, p. 139. Berlin, 1859.

Pour obvier aux déviations qui procèdent de la rotation, il y a deux voies à suivre: dans la première, on cherche à empêcher que le mouvement de rotation ne se produise; tandis que dans la seconde, on a pour but de régulariser la rotation, de manière à ce qu'il en résulte des effets déterminés. Pour supprimer le mouvement de rotation on a cru qu'il suffirait de construire des projectiles parfaitement sphériques et dans lesquels le centre de gravité concorderait avec celui de figure; mais comme il est presque impossible de réaliser pratiquement cette double condition de construction, on a alors imaginé de déterminer par l'équilibrage des projectiles sphériques de l'artillerie, celui de leurs diamètres qui contient les deux centres de gravité et de figure, afin de pouvoir toujours donner à cet axe d'équilibre telle ou telle position voulue dans l'âme de la bouche à feu. Ce moyen de régulariser la rotation n'étant pas applicable aux balles sphériques des armes à feu portatives, on a proposé et essayé de supprimer leur mouvement de rotation, en y appliquant une petite cheville de fer qui devait y fonctionner comme queue directrice; et ce moyen ayant été reconnu insuffisant, on a fini par abandonner la forme sphérique de la balle pour lui donner successivement celle d'un cylindre terminé en hémisphère, en cône, en demi-ellipsoïde, etc. Mais tous ces moyens et bien d'autres qu'on pourrait imaginer ne sont, à notre avis, que des palliatifs d'une efficacité fort douteuse.

Pour imprimer aux projectiles une rotation déterminée en direction et en intensité, on a jusqu'à ce jour employé deux moyens principaux. Le premier, qui est maintenant (*) en usage en Prusse pour tous les projectiles creux de

(*) Bien entendu en 1857.

l'artillerie, consiste à construire ces projectiles de manière à leur donner une excentricité de grandeur déterminée par l'expérience, et l'on réalise cette condition, en déplaçant le centre de la cavité sphérique interne, de telle façon que les parois externe et interne du projectile, n'ayant plus un même centre, ne sont plus d'épaisseur uniforme. L'axe d'équilibre du projectile ainsi construit, étant déterminé par l'équilibrage, et la trace du plan passant par cet axe d'équilibre et par celui de l'œil du projectile étant marqué à sa surface, on place ce projectile dans l'âme de la bouche à feu, de manière que son centre de gravité se trouve perpendiculairement soit au-dessous, soit au-dessus du centre de figure, suivant l'espèce de trajectoire qu'on veut obtenir.

A l'instant de la déflagration de la charge, les forces qui sollicitent le projectile ainsi disposé, ayant une résultante qui passe par le centre de figure, il en résulte que le projectile prend un double mouvement, savoir : l'un de translation comme si la résultante passait par le centre de gravité; et l'autre de rotation autour d'un axe passant par le même centre de gravité et perpendiculaire au plan vertical de projection, qui contient à la fois ce même centre et la direction de la force propulsive. Dans les deux cas ci-dessus indiqués de la position du centre de gravité, l'axe de la rotation sera évidemment horizontal, et le sens de la rotation sera, par rapport à l'hémisphère antérieur du mobile, de *haut en bas* dans le premier cas, et de *bas en haut* dans le second. Le projectile s'avançant dans l'air avec l'une des deux rotations spécifiées ci-dessus, et rencontrant de la part de ce fluide (ainsi que l'ont démontré les ingénieuses expériences du docteur Magnus) une résistance qui est plus grande sur l'hémisphère supérieur que sur l'inférieur dans le cas de la rotation de

haut en bas, et réciproquement dans le cas de la rotation en sens inverse, il en résulte d'abord dans le premier cas une diminution et dans le second une augmentation de portée, et ensuite la presque annulation des déviations latérales dans les deux cas.

Nous ferons remarquer que l'axe de rotation qu'on obtient ainsi n'est point stable, car cet axe ne correspond ni au moment d'inertie *maximum*, ni au *minimum*. Pour faire concorder l'axe de rotation avec l'axe principal du plus grand moment d'inertie, on a proposé de donner au vide intérieur des obus la forme d'un ellipsoïde allongé de révolution, dont le grand axe serait placé perpendiculairement au plan vertical de projection. Nous ne savons si une pareille disposition, qui assurerait la stabilité de l'axe de rotation, n'a jamais été mise en pratique.

Il est incontestable que le système prussien de projectiles excentriques à rotation réglée, que nous venons d'indiquer, présente de grands avantages dans les tirs de polygone; mais il est permis de douter qu'il les conserve sur le champ de bataille, où les complications qu'il comporte et l'habileté qu'il exige de la part des servants sont si peu compatibles avec les exigences d'un service presque toujours mêlé d'imprévu, de précipitation, d'émotion, etc.; et c'est probablement en se plaçant à ce point de vue des réalités de la guerre que l'artillerie russe, qui avait suivi l'exemple de la Prusse à ce sujet, y a maintenant renoncé (*), si nos renseignements sont exacts.

Le second procédé imaginé pour régler le mouvement de rotation des projectiles consiste à les obliger de suivre des rayures en hélice tracées dans la paroi de l'âme de la

(*) En 1857.

bouche à feu; de sorte que dans ce système, en même temps que le mobile reçoit par l'action de la charge un mouvement de translation suivant l'axe de l'âme, il prend aussi autour de son propre axe un mouvement de rotation qu'il conserve durant son trajet dans l'air.

Si le projectile est sphérique, le moment d'inertie étant le même autour de tous ses diamètres, il en résulte que tous les axes de rotation qu'il peut prendre sont également stables, ou, pour mieux dire, indifférents à tout déplacement qui peut survenir; mais si le mobile est aplati ou oblong dans le sens de l'axe de l'âme, la rotation a lieu autour de l'axe principal auquel correspond respectivement le moment d'inertie *maximum* ou *minimum*; et par conséquent le projectile se trouve alors dans la condition la plus favorable à la conservation du parallélisme de l'axe de rotation par rapport à lui-même.

Un projectile oblong, qui se meut dans le sens de son grand axe, éprouvant de la part de l'air une résistance moindre, comparativement à son poids, qu'un projectile sphérique de même poids, il s'ensuit que, à vitesses initiales égales, le premier de ces projectiles doit donner de plus longues portées que le second; et c'est pour diminuer plus encore la résistance de l'air, que l'on a substitué à la forme hémisphérique de la partie antérieure du projectile oblong la forme conique ou ogivale.

Dans le tir à grandes distances, on a obtenu avec des projectiles de ce genre, lancés par des canons rayés, des résultats supérieurs à ceux que fournissent les armes à feu ordinaires. Malheureusement, comme on est obligé, pour que la balle suive les rayures, de lui donner des vitesses initiales moindres, c'est-à-dire d'employer des charges plus petites que celles qui sont en usage pour les armes à âme lisse, il en résulte un tir courbe qui donne certainement des

résultats excellents dans les exercices de polygone où les distances sont exactement connues, mais qui en donne de beaucoup moins beaux sur un terrain inconnu, d'une nature quelconque et où l'appréciation des distances se fait à simple vue et est laissée à l'aptitude moralement et physiquement si variable, si incertaine, du tireur. Les trajectoires décrites par les projectiles tirés dans les armes rayées aujourd'hui en usage, manquent donc essentiellement de cette forme tendue qu'il est si désirable d'obtenir sur le champ de bataille; et c'est pourquoi l'on commence à sentir partout la nécessité d'un tir à charges plus fortes et, par conséquent, à trajectoires plus tendues. Pourra-t-on y parvenir, en persistant dans la voie qu'on a suivie jusqu'ici? c'est ce que l'avenir nous apprendra; mais on peut dès à présent prévoir que l'on aura pour cela de grandes difficultés à vaincre, surtout en ce qui concerne les bouches à feu de l'artillerie, parce que le frottement qu'éprouvent les ailettes, dont sont munis les projectiles oblongs, contre les rayures de l'âme, est énorme et peut occasionner la rupture de la pièce; sans compter que le projectile de ce genre peut, en s'arc-boutant dans l'âme, y produire de graves détériorations et même donner lieu à l'éclatement du canon (*).

(*) Depuis l'époque où ces pages ont été écrites, on est parvenu à rendre le tir des armes rayées plus rasant, au moyen d'une augmentation des charges de poudre et d'une diminution des calibres de l'âme. On en est venu aujourd'hui aux charges de $\frac{1}{5}$ du poids du projectile, imprimant des vitesses de 450 mètres.

Quoique les armes rayées actuelles donnent, aux grandes distances, un tir plus tendu que les anciennes armes lisses correspondantes, elles sont néanmoins encore surpassées, sous le rapport de la roideur du tir, par les armes lançant des projectiles lenticulaires, comme l'on peut s'en convaincre en jetant les yeux sur le tableau qui termine ce mémoire. Quelques expériences faites sur le tir des projectiles lenticulaires ont montré que ces projectiles fournissent un tir plus tendu que si le tir avait lieu dans le vide. C'est l'effet de la force opposée à la pesanteur provenant de l'action de l'air sur le projectile dont la partie antérieure tourne de bas en haut.

(*Addition de* 1873).

Mais est-il donc absolument nécessaire de persister dans cet ordre d'idées; ne pourrait-il pas être avantageux de tenter une autre voie que celle qu'on a suivie jusqu'à ce jour?

En méditant sur les lois qui régissent le mouvement des projectiles, il m'est venu quelques idées qui, si je ne me fais illusion, pourront conduire à une solution nouvelle de la question si importante des armes de précision.

Je prends tout d'abord pour point de départ que, dans l'état actuel de la question, les qualités principales qu'il faut donner au projectile, sont :

1° Stabilité de l'axe de rotation ;

2° Aptitude à pénétrer l'air plus facilement que ne le peuvent faire les projectiles sphériques ordinaires de même poids ;

3° Vitesse initiale aussi grande que celle des projectiles ordinaires.

Fig. 1.

Pour satisfaire à ces trois conditions, je propose un projectile large et aplati, de forme lenticulaire, lancé avec son petit axe perpendiculaire au plan de tir et animé d'un mouvement de rotation autour de ce même axe. La fig. 1 montre un projectile de ce genre : la flèche droite indique la direction du mouvement de translation, et la flèche courbe le sens de la rotation. La forme aplatie du projectile le rend apte à fendre facilement l'air, et son mouvement de rotation autour du petit axe, qui est celui des axes principaux auquel correspond le moment maximum d'inertie, en assure la stabilité. La perpendicularité de l'axe de rotation sur le plan de la trajectoire annulle les déviations latérales. Le sens de la rotation étant tel que la partie antérieure du projectile se meut de bas en haut, il en résulte sur la partie inférieure

du mobile une pression de l'air plus grande que sur la partie supérieure, et par suite un relèvement de ce mobile et une augmentation de portée.

On conçoit que, pour lancer un pareil projectile, il faut que la bouche à feu ait une âme dont la section droite soit de même forme que la section méridienne de ce projectile. La construction de cette âme pourra bien présenter quelque difficulté d'exécution, mais je ne la crois pas insurmontable, vu l'état actuel de l'industrie.

On peut imaginer des formes diverses pour la section méridienne d'un projectile du système ici proposé. C'est ainsi, par exemple, que le plan générateur pourrait être une demi-ellipse (*fig.* 1), un triangle isocèle (*fig.* 2), une ogive (*fig.* 3), etc. Bien que, pour un même poids du projectile et pour un même rapport entre son grand et son petit axe, la théorie de la résistance des fluides (théorie qui, soit dit en passant, est encore bien imparfaite) indique que sous ce rapport les deux dernières formes seraient plus avantageuses que la première, c'est cependant à celle-ci que je donne la préférence, afin d'éviter toute forme anguleuse dans l'âme de la pièce. (Voir la note A).

Fig. 2.

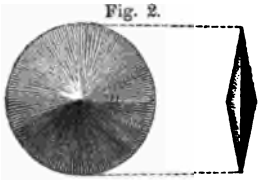
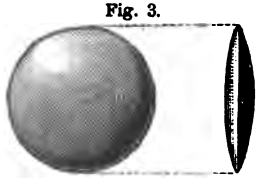


Fig. 3.



En admettant que les deux axes soient entre eux comme 4 : 1, la résistance éprouvée par un ellipsoïde de révolution aplati, mû perpendiculairement à son petit axe, est à la résistance qu'une sphère de même poids rencontre dans le même milieu, comme 0,30238 : 1. Or, comme la perte de vitesse que la résistance de l'air fait subir à un mobile sphérique est inversement proportionnelle au diamètre de

celui-ci, il s'ensuit qu'un ellipsoïde aplati, dont les axes sont entre eux comme 4 : 1, se trouvera, par rapport à la résistance de l'air, dans les mêmes conditions de tir qu'un projectile sphérique 36 fois plus pesant; ce qui suffit pour faire voir combien serait avantageuse la forme lenticulaire du projectile. De deux ellipsoïdes de même poids, mais dont l'un oblong et l'autre aplati, ayant le même rapport entre leur grand et leur petit axe et se mouvant tous deux dans la direction du grand axe, le premier rencontre de la part de l'air moins de résistance que le second, mais l'infériorité de celui-ci est largement compensée par la plus grande stabilité de son mouvement de rotation. Dans l'ellipsoïde oblong, l'axe de rotation correspond au moment minimum d'inertie, tandis que c'est le contraire qui a lieu pour l'ellipsoïde aplati; et la théorie démontre que la rotation est plus stable autour de l'axe du moment maximum d'inertie qu'autour de celui du moment minimum. (Voir la note B).

La plus grande stabilité des projectiles aplatis est confirmée par l'expérience. On peut consulter à ce sujet le Mémoire que le colonel Didion a publié dans le 27e cahier du Journal de l'École polytechnique, sous le titre de: *Expériences sur la justesse comparée du tir des balles sphériques, plates et longues.* Il convient de noter cependant que les expériences rapportées dans ce Mémoire ne concernent que des balles projetées dans la direction de leur axe de rotation et non perpendiculairement à ce même axe, comme devraient l'être les projectiles du système que je propose ici.

Si l'on n'avait à tenir compte que de la stabilité du mouvement de rotation, la forme la plus avantageuse possible du projectile serait la forme annulaire; mais comme

cette forme ne saurait convenir aux projectiles de guerre, je crois inutile de m'étendre davantage sur ce point, et je me bornerai à faire remarquer que les projectiles creux aplatis ont une forme très-avantageuse à la stabilité de la rotation.

L'expérience seule pourra décider la question de savoir quel est le meilleur rapport de grandeur à établir entre les deux axes. On pourrait, pour les premiers essais, prendre celui de 4 : 1. C'est ce rapport que j'ai pris pour base dans le tracé du canon qui figure sur la planche annexée au présent Mémoire.

Reste à déterminer maintenant le moyen d'imprimer le mouvement de rotation à un projectile de ce genre. On pourrait en imaginer plusieurs; je vais en indiquer quelques-uns.

1° Si l'on pratiquait, au fond et à la partie inferieure de l'âme, une chambre ayant un diamètre plus petit que le calibre de la pièce, il arriverait que le projectile, recevant au moment de l'inflammation dé la charge, une impulsion qui ne passerait pas par son centre de gravité, prendrait nécessairement et simultanément un double mouvement de translation et de rotation.

On objectera sans doute que comme le projectile, à peine déplacé, présente toute sa surface postérieure à l'action des gaz, la première impulsion excentrique qu'il aura reçue, sera insuffisante pour lui imprimer le mouvement de rotation.

Mais n'est-il pas plus que probable que, quand la masse entière du projectile commence à se mouvoir, son centre de gravité a déjà reçu une vitesse de grandeur *finie*, et que sa vitesse angulaire de rotation est alors déjà également de grandeur *finie*?

En effet, quelque dure que puisse être la matière du projectile, la pression qu'exerce sur elle la poudre enflammée, a pour premier effet de comprimer les molécules de la partie de cette matière qui reçoit directement cette pression, soit donc ici la partie post-inférieure du projectile ; les molécules adjacentes aux premières sont comprimées à leur tour, et la compression se transmettant ainsi de proche en proche à travers la masse, finit par arriver à la partie antérieure du projectile. Cette propagation du mouvement s'effectue dans une très-petite fraction de seconde. L'effet de la pression durant ce temps très-court est ce qu'on appelle un *choc* ou une *percussion*, c'est-à-dire une vitesse imprimée presque instantanément et sans que le projectile se soit encore sensiblement déplacé. Un effet de ce genre étant admis, on comprend que le projectile puisse concevoir à l'origine un mouvement fini de translation et de rotation, de la même manière que s'il recevait un choc dont la direction ne passerait pas par son centre de gravité. On ne peut décider *a priori* si cela arrive réellement, et il n'y a que l'expérience qui puisse nous éclairer à cet égard.

2° Un autre moyen d'imprimer le mouvement de rotation au projectile consisterait à en munir la surface de saillies telles, que la résistance de l'air devenant plus grande sur une moitié de cette surface que sur l'autre, le projectile pourrait, durant son trajet dans ce milieu fluide, acquérir la rotation voulue. Il ne serait pas difficile d'imaginer un projectile formé de manière à ce que le choc de l'air lui imprimât un mouvement de rotation.

3° Si l'on enlevait à un projectile sphérique deux calottes égales et ayant leurs bases perpendiculaires à un même diamètre, et si, prenant pour axe de rotation

ce diamètre raccourci et devenu par là l'axe du moment maximum d'inertie du projectile, on fixait soit à l'une, soit à chacune de ses faces latérales une cheville directrice qui serait obligée de se loger et de se mouvoir dans des rayures cycloïdales, creusées dans les parois latérales de l'âme, il est évident que ce projectile prendrait, en parcourant l'âme, un mouvement de rotation, qu'il conserverait durant son trajet dans l'air.

4° Si nous supposons que le projectile sphérique soit lisse ainsi que la paroi de l'âme de la pièce, et qu'on ait fixé contre la tranche de la bouche une traverse en bois ou en métal qui recouvre un segment supérieur de la section de l'âme, il est évident alors que le projectile arrivant à la bouche de la pièce avec toute sa vitesse acquise, heurtera cette traverse, la rompra et prendra, par là, un mouvement de rotation de bas en haut ; et l'on conçoit du reste que la rotation aurait lieu en sens inverse, si la traverse recouvrait un segment inférieur de la section de l'âme.

Selon que la traverse sera plus ou moins élevée au-dessus de l'axe de la pièce, l'angle de départ du projectile pourra être positif, négatif ou nul. (Voir la note C).

5° Enfin, si nous supposons qu'on ait donné à l'âme de la bouche à feu une certaine courbure dans le sens du plan de tir, le projectile tendra, en chaque point et à chaque instant de son trajet dans l'âme, à suivre la tangente, mais comme la résistance que lui oppose la paroi de l'âme courbe, l'oblige à s'infléchir à chaque point de cette paroi, il en résultera une pression normale à la surface courbe, pression qu'on désigne sous le nom de *force centrifuge*.

Or, cette force centrifuge donnera naissance à une force

de frottement, appliquée à l'équateur du projectile en sens inverse du mouvement de translation, qui engendrera un mouvement de rotation.

Si l'âme tourne sa concavité vers le sol, il est évident que le projectile prendra alors une rotation de bas en haut par rapport à son hémisphère antérieur.

A cause de la grande vitesse dont le projectile est animé, il suffira d'une légère courbure de l'âme pour lui imprimer une notable vitesse angulaire de rotation. En admettant que la courbe soit un arc de cercle, on trouve que, pour donner à la balle du fusil une rotation de 100 tours par seconde, le rayon de courbure du canon de fusil devrait être égal à 21 mètres et la flèche de la courbe $0^m,007$. On manque des données numériques nécessaires pour pouvoir calculer exactement la courbure qu'il faudrait donner à l'axe d'une bouche à feu ; mais on peut, sans craindre de se tromper de beaucoup, estimer que le rayon de courbure du canon de 6 livres (projectile pesant 3 kil.) aura plus de 7 mètres, et la flèche de la courbe moins de $0^m,04$ de longueur ; ce qui prouve, à ce qu'il me semble, qu'il n'est point à craindre que la courbure de l'âme puisse rendre le chargement de la pièce trop difficile. (Voir la note D).

La vitesse verticale que l'arme acquiert en raison de la force centrifuge, ne suffit pas non plus pour donner lieu à des inconvénients, car le calcul donne respectivement, pour sa valeur, dans le fusil et le canon, dont il est ici question, $0^m,056$ et $0^m,613$.

Des divers moyens indiqués ci-dessus pour imprimer au projectile un mouvement de rotation, ce dernier est de beaucoup le meilleur. Il est à craindre que le premier et le deuxième ne soient pas capables de fournir une vitesse angulaire suffisante pour assurer la stabilité de la rotation ; le

deuxième exige en outre une forme de projectile qui s'écarte trop de cette simplicité qui est toujours si désirable dans les choses de la guerre. Le troisième offrirait les mêmes inconvénients que les canons rayés actuels, et l'on a vu que le problème que nous cherchons ici à résoudre, a précisément pour but d'y obvier. Quant au quatrième, il conviendrait peut-être pour le canon, mais s'adapterait mal aux armes à feu portatives.

Enfin le cinquième moyen a sur le précédent l'avantage d'imprimer successivement, peu à peu et non tout d'un coup, le mouvement de rotation au projectile ; il est vrai qu'il a contre lui la difficulté de construction de l'âme courbe, mais l'industrie moderne est parvenue à vaincre maintes difficultés d'un ordre bien plus élevé.

Au lieu de lancer le projectile avec son axe de rotation perpendiculaire au plan vertical de tir, on pourrait aussi le tirer avec cet axe situé dans ce même plan : il suffirait pour cela de tourner la pièce de manière à rendre horizontal le grand axe de la section droite de l'âme. Cette disposition fournirait un meilleur tir à ricochet, surtout sur l'eau, ainsi que des portées plus longues dans le cas du tir en dépression ; mais le besoin de l'emploi de ce genre de tir se présente très-rarement dans la pratique, et d'ailleurs cette disposition de la pièce présenterait l'inconvénient de donner lieu à une dérivation latérale, tandis que la dérivation est tout à l'avantage de la portée dans la première disposition du grand axe de l'âme.

En résumé, nous avons vu :

1° Que les déviations proviennent principalement du mouvement de rotation du projectile, et qu'il faut, pour les combattre, tâcher de régler ce mouvement de manière à ce qu'il produise des effets constants et déterminés ;

2° Qu'on a employé à cette fin les armes rayées et des projectiles oblongs pour lesquels la résistance de l'air est moindre que pour des projectiles sphériques de même poids ;

3° Que bien que ces perfectionnements soient très-importants, ils offrent aujourd'hui encore le grave inconvénient de ne permettre que l'emploi de faibles vitesses initiales et de fournir par conséquent un tir peu tendu (*) ;

4° Que pour remédier à cet inconvénient, il devient nécessaire de s'engager dans une autre voie que celle qu'on a suivie jusqu'ici ;

5° Enfin, que je propose, en conséquence, un projectile lenticulaire animé d'un mouvement de rotation autour de son axe de figure perpendiculaire au plan de tir, à l'aide d'un canon courbe dont la concavité est tournée vers le bas.

Je ne me dissimule pas qu'on aura plus d'une difficulté à surmonter, lorsque, quittant les régions de la spéculation scientifique, il faudra descendre sur le terrain de la réalité pratique ; mais je nourris néanmoins l'espoir que, eu égard à la solidité des principes théoriques sur lesquels se fonde l'idée nouvelle que je viens soumettre à l'appréciation des hommes compétents, on jugera cette idée digne d'être réalisée et expérimentée.

(*) Voyez l'*addition* à la page 12.

NOTE A.

CALCUL DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR SUR LE PROJECTILE.

Expression générale de la résistance qu'éprouve un corps quelconque en se mouvant dans un milieu. Pour un corps solide, de forme quelconque, la résistance, estimée suivant la direction du mouvement, est exprimée par

$$R = \rho v^2 \int \omega \cos^3 \alpha ,$$

ρ étant la densité du fluide dans lequel le corps se meut; v, la vitesse du mobile; ω, l'élément de sa surface; α, l'angle que la normale à l'élément ω fait avec la direction de la vitesse v (*).

En prenant l'axe des x parallèle à la vitesse v, α sera l'angle formé par la normale avec l'axe des x. Soit γ l'angle formé par la même normale avec l'axe des z, on aura

$$\omega = \frac{dx\,dy}{\cos\gamma};$$

d'où l'on tire

$$R = \rho v^2 \iint dx\,dy \frac{\cos^3\alpha}{\cos\gamma}.$$

(*) Voir Poisson, *Traité de Mécanique*, tome II, pag. 37.

Or, on a

$$\cos\alpha = \frac{-p}{\sqrt{1+p^2+q^2}}, \qquad \text{et} \qquad \cos\gamma = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}},$$

où

$$p = \frac{dz}{dx}, \qquad \text{et} \qquad q = \frac{dz}{dy} \ (*).$$

En substituant ces valeurs dans l'expression de la résistance, on obtient

$$R = \rho v^2 \iint dx\,dy \frac{-p^2}{1+p^2+q^2},$$

intégrale qu'il faut étendre à toute la partie antérieure de la surface du mobile, comprise dans le cylindre circonscrit, dont les génératrices sont parallèles à l'axe des x.

Applications.

En appliquant cette dernière formule aux solides respectivement engendrés: par la révolution d'une ellipse autour de son petit axe; d'un triangle isocèle autour de sa base; d'une ogive autour de sa base, on obtient les valeurs suivantes, pour la résistance éprouvée dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation; a étant le demi-diamètre de l'équateur, et b le demi-axe polaire ou de rotation:

(*) Voir LEROY, *Analyse appliquée à la géométrie des trois dimensions*, p. 180.

1° Pour l'ellipsoïde aplati (*fig.* 1)

$$R = \frac{2}{3}\pi\rho v^2 a b^2 \frac{2a+b}{(a+b)^2}.$$

Si l'on fait $a = b = r$, on tombe sur l'expression connue de la résistance éprouvée par une sphère:

$$R = \frac{1}{2}\pi\rho v^2 r^2.$$

Le rayon d'une sphère de même volume que l'ellipsoïde est

$$r = a^{\frac{2}{3}} b^{\frac{1}{3}}.$$

La résistance éprouvée par une sphère de même volume que l'ellipsoïde est

$$\frac{1}{2}\pi\rho v^2 a^{\frac{4}{3}} b^{\frac{2}{3}}.$$

On en déduit, pour le rapport entre la résistance d'un ellipsoïde et celle d'une sphère de même poids,

$$\frac{4}{3}\frac{b^{\frac{4}{3}}}{a^{\frac{1}{3}}}\frac{2a+b}{(a+b)^2},$$

ou bien, en représentant par n le rapport $\frac{b}{a}$ entre les deux demi-axes,

$$\frac{4}{3} n^{\frac{4}{3}} \frac{2+n}{(1+n)^2}.$$

Si $n=\frac{1}{4}$, on a, pour le rapport des résistances de l'ellipsoïde et de la sphère de même volume,

0,30238.

2° Pour le solide formé par la réunion de deux cônes droits, dont les bases se confondent (*fig.* 2),

$$R=\frac{4}{3}\rho v^2\frac{ab^3}{a^2+b^2}.$$

La résistance éprouvée par une sphère de même volume a pour expression

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{5}{3}}\pi\rho v^2 a^{\frac{4}{3}}b^{\frac{2}{3}}.$$

Par conséquent le rapport des deux résistances est

$$\frac{2^{\frac{11}{3}}}{3\pi}\frac{b^{\frac{7}{3}}}{a^{\frac{1}{3}}(a^2+b^2)}.$$

Si l'on fait $\frac{b}{a}=n$, on a

$$\frac{2^{\frac{11}{3}}}{3\pi}\frac{n^{\frac{7}{3}}}{1+n^2}.$$

Si $n=\frac{1}{4}$, on a, pour le rapport des résistances du double cône et de la sphère d'égal volume,

0,04993.

3° Pour la lentille biconvexe (*fig.* 3)

$$R = \rho v^2 \left\{ \frac{(a^2+b^2)^2}{2b^2} \operatorname{arc\,tang} \frac{b}{a} - \frac{a(a^2-b^2)}{2b} - \frac{4}{3} \frac{a^3 b (a^2-b^2)}{(a^2+b^2)^2} \right\}.$$

La résistance contre une sphère d'égal volume est

$$\frac{1}{2} \pi \rho v^2 \left\{ \frac{b(3a^2+b^2)}{4} \right\}^{\frac{2}{3}};$$

de sorte qu'en faisant, comme ci-dessus, $\frac{b}{a} = n$, le rapport entre les deux résistances est

$$\frac{2^{\frac{4}{3}}}{3\pi} \frac{3(1+n^2)^4 \operatorname{arc\,tang} n - 3n(1-n^6) - 11n^3(1-n^2)}{n^{\frac{8}{3}}(1+n^2)^2(3+n^2)^{\frac{2}{3}}}.$$

Dans le cas de $n = \frac{1}{4}$, le rapport entre la résistance contre une lentille biconvexe et celle qui a lieu contre une sphère de même volume devient

0,11620.

De tout ce qui précède il résulte que les résistances éprouvées par une sphère et par les corps respectivement engendrés par la révolution d'une ellipse, d'un triangle isocèle, et d'une ogive, autour du petit axe, le grand axe étant quatre fois le petit, sont entre elles dans le rapport des nombres

1 : 0,30238 : 0,04993 : 0,11620,

lorsque tous ces corps ont le même volume.

Il s'ensuit que la forme la plus avantageuse serait celle qui aurait pour section un triangle isocèle. Remarquons toutefois que la théorie ordinaire de la résistance des fluides n'est pas tout à fait d'accord avec l'expérience. On n'a pas encore fait d'expériences sur les résistances éprouvées par des corps de forme aplatie, disposés avec leur axe de rotation perpendiculaire à la direction du mouvement. Mais celles qu'on a faites sur des corps de révolution ayant leur axe de rotation dans la direction du mouvement, ont démontré que la résistance des corps qui présentent des pointes ou des arêtes vives est en réalité plus grande que celle que donnerait la théorie, tandis que la résistance des corps arrondis est plus petite. Ainsi, suivant la théorie, la résistance qu'éprouve un cône droit, dans la direction de son axe, l'angle au sommet étant de 60°, devrait être le quart de la résistance qu'éprouverait sa base circulaire ; tandis que l'expérience montre qu'elle en est plus que la moitié. Au contraire, tandis que d'après la théorie, la résistance d'une sphère devrait être la moitié de celle de son grand cercle, l'expérience réduit ce rapport à $\frac{2}{5}$.

Il est probable que l'expérience montrerait le même désaccord relativement aux corps aplatis, et que la diminution de résistance, due à la forme acuminée, n'est pas aussi grande que celle qui serait indiquée par la théorie ordinaire.

Cela posé, comme il importe d'éviter toute forme anguleuse dans l'âme, je pense que la forme ellipsoïdale doit être préférée à toutes les autres ci-dessus mentionnées.

NOTE B.

DE LA STABILITÉ RELATIVE DE LA ROTATION DES CORPS DE RÉVOLUTION APLATIS ET OBLONGS.

Un corps de révolution quelconque qui tourne librement avec une vitesse angulaire θ autour de son axe de figure, est heurté par un *couple* G: trouver le changement produit dans le mouvement de rotation.

La grandeur du couple N qui, appliqué au corps en repos, serait capable de produire la rotation θ dont il est actuellement animé, est donnée par l'expression (*)

$$N = \theta \int r^2 dm,$$

dans laquelle $\int r^2 dm$ représente le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe de figure, qui est un des axes principaux. De plus, l'axe du couple N coïncide avec l'axe de figure.

L'axe du couple résultant des deux couples G et N sera la diagonale du parallèlogramme construit avec G et N pour côtés. Cette diagonale se rapprochera d'autant plus de N que N sera plus grand. Il s'ensuit que l'angle formé par l'axe du couple résultant avec l'axe de figure du corps, est d'autant plus petit que $\int r^2 dm$ est plus grand.

Or, de deux corps de révolution de même masse, et dont l'un est aplati et l'autre oblong, le premier a, par rapport

---

(*) Voyez Poinsot, *Théorie nouvelle de la rotation des corps.*

à l'axe de figure, un moment d'inertie évidemment plus grand que le second : par conséquent, l'angle formé par l'axe du couple résultant, après le choc, avec l'axe de figure, est plus petit pour un corps aplati que pour un corps oblong.

Pour se représenter le mouvement de rotation du corps après le choc dans tout le reste de son trajet, il convient de se représenter deux cônes droits à bases circulaires et ayant même angle au sommet ; l'un de ces cônes, étant mobile avec le corps et ayant pour axe l'axe de figure du corps, tourne uniformément sans frottement sur l'autre, celui-ci étant fixe dans l'espace absolu et ayant pour axe l'axe fixe du couple auquel est dû le mouvement.

Cela posé, il est évident que plus est petit l'angle formé par les axes des deux cônes, plus sera petite la perturbation que subit la rotation primitive du corps. Et puisque nous avons vu, en traitant des corps aplatis, que cet angle est plus petit pour ces corps que pour les autres, on en conclut la plus grande stabilité de la rotation des corps de ce genre.

Parmi les arguments plus ou moins persuasifs qu'on pourrait mettre en avant en faveur du genre de projectiles ici proposés, j'en citerai deux d'un ordre bien différent, sans toutefois y attacher grande importance.

Le premier se rapporte au système planétaire, qui, comme on sait, est composé de corps de forme sphéroïdale aplatie, tous animés d'un mouvement de translation dans le même sens autour du soleil et d'un mouvement de rotation aussi dans le même sens autour de leur axe de figure. Assurément les éléments du système planétaire ont la plus grande stabilité ; et comme dit Laplace : « Il semble « que la nature ait tout disposé dans le ciel pour assurer « la durée du système planétaire, par des vues semblables

« à celles qu'elle nous paraît suivre si admirablement « sur la terre, pour la conservation des individus et pour « la perpétuité des espèces..... Par sa rotation, la terre a « été aplatie, et son axe de révolution est devenu l'un « de ses axes principaux; ce qui rend invariables les climats « et la durée du jour. » (*)

Cela posé, il semble qu'on ne peut que gagner en cherchant à imiter la nature pour rendre stables les mouvements que nous produisons sur la terre.

Il est bien vrai que la forme des planètes est peu aplatie, et que leur rotation est *directe* et non *rétrograde*, comme celle qu'on propose pour les projectiles; mais il faut ne pas perdre de vue que les planètes, ne se mouvant pas dans un milieu résistant, n'ont pas besoin de ces conditions.

Le second argument est puisé dans la pratique suivie par les jeunes garçons pour lancer des pierres: tout le monde sait qu'ils choisissent toujours les pierres les plus aplaties, les préférant aux rondes et plus encore aux oblongues; et que les plus habiles savent leur communiquer un mouvement de rotation autour de leur petit axe.

Nous avons dans le jeu du palet un exemple de la stabilité de la rotation des corps aplatis, autour de l'axe de figure: les joueurs habiles savent très-bien que, pour assurer le parallèlisme dans le jet du palet, il faut lui imprimer un mouvement de rotation autour du petit axe.

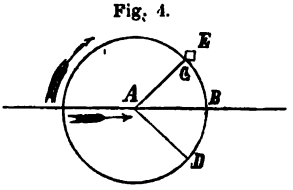
(*) *Exposition du système du monde*, 6me édition, pag. 445, 446.

NOTE C.

DU MOUVEMENT DE ROTATION COMMUNIQUÉ AU PROJECTILE PAR LE CHOC CONTRE UNE TRAVERSE FIXE.

Un solide de révolution animé d'une vitesse de translation v_0 et d'une vitesse angulaire de rotation ω_0 autour de son axe de figure, heurte une traverse immobile, parallèle à l'axe de rotation, et produit la rupture de cette traverse. On demande quel mouvement prendra ce mobile après le choc ?

Fig. 4.



Soient CBD et CE (*fig.* 4) les sections du mobile et de la traverse par un plan mené par le centre de gravité du mobile perpendiculairement à la traverse. Représentons la distance AC par a, et l'angle BAC par α. Les directions de la vitesse de translation et de la vitesse de rotation initiales du mobile sont celles qu'indiquent les flèches. Au point C se développe, pendant le choc, une force F normale, et une force tangentielle fF, f étant le coefficient de frottement. En désignant par m la masse du mobile ; par u sa vitesse variable suivant la droite AC ; par ω sa vitesse angulaire variable ; par I son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation, on a les équations différentielles suivantes du mouvement de translation et de rotation :

$$m\frac{du}{dt} = -F, \qquad \frac{d\omega}{dt} = -\frac{afF}{I}.$$

En intégrant, on trouve

$$mu_1 - mu_0 = -\int F dt\,, \qquad \omega_1 - \omega_0 = -\frac{af}{I}\int F dt\,;$$

u_0 et ω_0 étant les valeurs initiales des vitesses u et ω; u_1 et ω_1 étant les valeurs finales des mêmes vitesses après le choc.

Si l'on décompose la vitesse v_0 en deux: l'une normale $v_0 \cos\alpha$; l'autre tangentielle $v_0 \sin\alpha$, on aura

$$u_0 = v_0 \cos\alpha.$$

On aura donc

$$\int F dt = mv_0 \cos\alpha - mu_1 \text{ et } \omega_1 = \omega_0 - \frac{af}{I}(mv_0 \cos\alpha - mu_1).$$

Il reste à trouver u_1; à cet effet, reprenons la première équation, qui peut se mettre sous la forme

$$m\frac{u\,du}{ds} = -F\,;$$

d'où l'on tire

$$mu_1^2 - mu_0^2 = -2\int F ds\,.$$

L'intégrale contenue dans le second membre exprime le travail dynamique nécessaire pour produire la rupture de la traverse, travail qui sera fourni par l'expérience. Représentons-le par L; on a alors

$$u_1^2 = v_0^2 \cos^2\alpha - \frac{2L}{m},$$

et, en posant

$$\frac{2L}{mv_0^2 \cos^2 \alpha} = K,$$

il vient

$$u_1 = v_0 \cos \alpha \sqrt{1 - K}.$$

Cette valeur de u_1 étant introduite dans l'expression de ω_1, on obtient

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{af m v_0 \cos \alpha}{I} (1 - \sqrt{1 - K}).$$

Après le choc et la rupture de la traverse, les deux composantes de la vitesse de translation du mobile sont réduites: la normale à

$$u_1 = v_0 \cos \alpha \sqrt{1 - K};$$

et la perpendiculaire à

$$v_0 \sin \alpha - \frac{f}{m} \int F dt = v_0 \sin \alpha - f v_0 \cos \alpha (1 - \sqrt{1 - K});$$

et cela parce que le centre de gravité doit se mouvoir, comme si la masse y était concentrée et comme si le frottement y était appliqué parallèlement à sa direction.

En composant ces vitesses, on trouvera la vitesse de translation après le choc

$$v_1 = v_0 \cos \alpha \sqrt{1 - K + \left[\operatorname{tang} \alpha - f (1 - \sqrt{1 - K})\right]^2}.$$

En désignant par β l'angle formé par la vitesse v_1 avec la droite AC, on aura

$$\operatorname{tang}\beta = \frac{\operatorname{tang}\alpha - f(1-\sqrt{1-K})}{\sqrt{1-K}}.$$

Si l'on veut que $\beta = \alpha$, c'est-à-dire que le mobile ne soit pas dévié de sa direction initiale, il faudra faire

$$\operatorname{tang}\alpha = f,$$

et alors il viendra

$$v_1 = v_0\sqrt{1-K},$$

$$\omega_1 = \omega_0 - amv_0\sin\alpha(1-\sqrt{1-K}) = \omega_0 - am\sin\alpha(v_0 - v_1).$$

Si l'on veut que la vitesse de rotation soit la plus grande possible, il faudra faire $K = 1$, c'est-à-dire

$$\cos\alpha = \sqrt{\frac{2L}{mv_0^2}},$$

et alors il vient

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{af}{I}\sqrt{2mL},$$

$$v_1 = v_0\sin\alpha - fv_0\cos\alpha,$$

$$\operatorname{tang}\beta = \infty;$$

par conséquent la déviation du mobile sera $\frac{\pi}{2} - \alpha$ au-dessous de sa direction primitive.

Il faut remarquer que les formules exposées jusqu'ici ne doivent pas être étendues au-delà des valeurs de α qui réduisent à zéro l'une ou l'autre composante de la vitesse v_1, parce qu'il est de l'essence des résistances passives de détruire les vitesses, mais non pas d'en produire.

On manque, sur la résistance vive des solides à la rupture, d'expériences directes qui puissent nous fournir la valeur de L pour les diverses substances. La théorie ordinaire de la résistance des solides donnerait pour un prisme appuyé à ses extrémités

$$L = \frac{R^2}{18E} V,$$

E étant le coefficient d'élasticité ; R le coefficient de rupture ; V le volume du prisme. Et pour un prisme encastré aux extrémités

$$L = \frac{R^2}{72E} V.$$

Mais ces formules conduisent à des résultats trop faibles.

Dans le cas présent, dans lequel le projectile emportera une partie de la traverse, sans donner au reste le temps de s'infléchir, il me semble qu'on pourrait appliquer de préférence la théorie de la pénétration des projectiles ; théorie suivant laquelle le volume de l'immersion est proportionnel à la perte de force vive du projectile ; ce qui donne

$$L = hV,$$

V étant le volume du morceau emporté de la traverse, et

h un coefficient numérique qui, d'après les expériences de Metz, est

Pour le bois de chêne	3.008.000
Pour la fonte	82.300.000 (*).

En appliquant les formules expliquées ci-dessus au cas d'un projectile ellipsoïdal aplati du poids de 3 kil., ayant pour demi-axes $a = 0^m,0742$ et $b = 0^m,0185$, animé d'une vitesse de translation de 500^m, mais sans aucune vitesse de rotation, auquel on veut imprimer une vitesse angulaire de $n = 100$ révolutions par seconde, au moyen d'un choc contre une traverse de bois de chêne, les formules à employer sont:

$$I = \frac{2}{5} m a^2 ,$$

$$\cos \alpha = \frac{4}{5} \frac{a n \pi}{f v_0} ,$$

$$L = \frac{m v_0^2 \cos^2 \alpha}{2} ;$$

de sorte qu'en posant $a = 0,0742$, $\pi = 3,14159$, $m = \frac{3}{9,80517}$, $n = 100$, et $f = 0,5$ (entre fer et bois), il vient

$$\alpha = 85° 43' 20'' \quad \text{et} \quad L = 212,8 \text{ kilogrammètres.}$$

Or $$L = 3.008.000\ V ;$$

donc $$V = 0^{m.\,c.},000071.$$

(*) Voir le N° IV du *Mémorial de l'artillerie.*

Si l'on suppose que le morceau emporté de la traverse n'a que $0^m,03$ de longueur, on trouve pour le côté de la section carrée de la traverse $0^m,049$. Si la traverse est en fonte, on trouve que sa section carrée devrait avoir $0^m,009$ de côté.

La vitesse de translation du projectile après le choc devient $479^m,96$, et la déviation au-dessous de la direction primitive est égale à 4° 16′ 40″.

NOTE D.

DU MOUVEMENT DE ROTATION DU PROJECTILE RÉSULTANT DE LA COURBURE DE L'AME.

Un projectile sollicité par la force de la poudre se meut dans un canon courbe; on demande d'en déterminer le mouvement de rotation.

La force sollicitante de la poudre agit sur le centre du projectile dans la direction de la tangente à la courbe qu'il doit parcourir. Par conséquent, le projectile exerce contre la paroi de l'âme, une pression égale à la force centrifuge (*)

$$m\frac{u^2}{\rho},$$

m étant la masse du mobile, u sa vitesse et ρ le rayon du cercle osculateur.

Cette pression engendre une force de frottement

$$fm\frac{u^2}{\rho},$$

appliquée à l'équateur du projectile (f étant le coefficient de frottement).

(*) Je néglige la pression provenant du poids du projectile laquelle devrait être ajoutée ou retranchée, suivant le sens de la courbure, parce qu'elle est très-petite comparativement à la force centrifuge. Il serait d'ailleurs très-facile d'en tenir compte.

Le mouvement de rotation du projectile sera déterminé par l'équation

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{amf}{I}\frac{u^2}{\rho},$$

dans laquelle ω est la vitesse angulaire, t le temps, a le rayon de l'équateur du projectile, I le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation. On en tire

$$\omega = \frac{amf}{I}\int\frac{u^2 dt}{\rho}.$$

Pour plus de simplicité nous ferons ρ constant, c'est-à-dire que nous supposerons que la courbe est un arc de cercle; on aura alors

$$\omega = \frac{amf}{\rho I}\int u^2 dt.$$

Le problème de trouver le rayon de l'arc qui produit une vitesse de rotation donnée, sera résolu par la formule

$$\rho = \frac{amf}{\omega I}\int u^2 dt.$$

Soit n le nombre de révolutions par seconde que l'on veut donner au projectile, on aura

$$\omega = 2\pi n,$$

et par suite

$$\rho = \frac{amf}{2\pi n I} \int u^2 dt,$$

ou bien, si l'on veut y introduire le chemin parcouru s,

$$\rho = \frac{amf}{2\pi n I} \int u\, ds\,.$$

Pour un ellipsoïde de révolution

$$I = \frac{2}{5} m a^2,$$

et par conséquent

$$\rho = \frac{5f}{4\pi a n} \int u\, ds\,.$$

Pour avoir l'intégrale contenue dans le second membre, il serait nécessaire de connaître la vitesse u en fonction de l'espace s. Comme les théories que l'on a sur le mouvement que prennent les projectiles sous l'action de la poudre dans les armes à feu, sont peu satisfaisantes, il vaut mieux recourir à l'expérience pour déterminer cette intégrale. On trouve dans les *Nottons fondamentales de mécanique, etc.* par A. Morin (2e édition), un tableau des vitesses de la balle de 28gr.,8 aux différents points de son trajet dans l'âme du fusil du calibre de 18 mill., la charge étant de 8 gr.; on en déduit facilement le tableau suivant :

ds	u	uds	dt
0^{m},250	376^{m},45	94, 1	0″, 00066
0 ,187	362 ,85	67, 9	0 , 00052
0 ,153	333 ,20	51, 0	0 , 00046
0 ,119	301 ,47	35, 9	0 , 00039
0 ,102	273 ,63	27, 9	0 , 00037
0 ,085	241 ,08	20, 5	0 , 00035
0 ,068	191 ,30	13, 0	0 , 00036
0 ,034	138 ,46	4, 7	0 , 00025
0 ,017	102 ,30	1, 7	0 , 00017
0 ,020	44 ,66	0, 9	0 , 00045
	TOTAL .	317 ,6	0 , 00398

On a, par conséquent,

$$\int uds = 317{,}6 \qquad \text{et} \qquad \int dt = 0'',00398.$$

On peut, à l'aide de ces données, déterminer la courbure du fusil destiné à lancer une balle ellipsoïde du poids de 20^{gr},5, ayant pour demi-axes $a = 0^{m},012$ et $b = 0^{m},003$.

En prenant $f = 0{,}2$ et $n = 100$, il vient $\rho = 21^{m},06$.

Si la longueur de l'âme est $1^{m},095$, la flèche de l'arc sera de $0^{m},007$ en son milieu, et de $0^{m},028$ à son extrémité : d'où il s'ensuit que, pour conserver l'angle de mire actuel, on devra augmenter la hausse fixe de 28 mill.

Il importe de connaître le mouvement de translation imprimé à l'arme par l'action de la force centrifuge du projectile. Je suppose que l'âme tourne sa concavité vers le sol. En représentant par M la masse de l'arme, par V la vitesse verticale de son centre de gravité, on a pour le mouvement vertical de translation

$$M\frac{dV}{dt} = m\frac{u^2}{\rho} - Mg\,;$$

d'où l'on tire

$$V = \frac{m}{M}\int\frac{u^2\,dt}{\rho} - gt\,;$$

et, en faisant ρ constant,

$$V = \frac{m}{M\rho}\int u^2\,dt - gt.$$

Nous avons trouvé ci-dessus

$$\int u^2\,dt = 317{,}6\,, \qquad t = 0'',00398 \qquad \text{et} \qquad \rho = 21{,}06\,;$$

en outre, dans le fusil

$$\frac{M}{m} = 159\,;$$

on aura donc

$$V = 0^m,095 - 0^m,039 = 0^m,056.$$

Cette vitesse correspond à la hauteur de $0^m,00016$, c'est-à-dire que le fusil, en vertu de la pression du projectile contre la paroi supérieure de l'âme, se soulèvera moins de $\frac{1}{5}$ de millimètre. Elle n'est donc pas comparable à la vitesse du recul qui dépasse $2^m,5$.

Pour calculer les mêmes quantités dans le canon proposé de 3 kil., il faudrait connaître l'intégrale $\int u\,ds$. Il n'existe pas jusqu'à présent d'expériences qui puissent nous la fournir. Celles qui sont maintenant (*) en voie d'exécution chez nous sur la poudre de divers procédés de fabrication, pourront nous la donner. En attendant, les considérations ci-après pourront donner une idée de ce que seront, d'une part, le rayon de courbure de l'âme et, d'autre part, le mouvement vertical du canon produit par la force centrifuge.

A coup sûr les vitesses qu'une charge, représentant la même fraction de poids du projectile, imprime aux projectiles aux différents points de l'âme sont plus grandes dans le canon que dans le fusil. De plus, la longueur du canon est presque double de celle du fusil. Je crois donc ne rien exagérer en prenant pour valeur de $\int u\,ds$ le double de la valeur trouvée pour le fusil ; je suppose donc

$$\int u\,ds = 635.$$

Dans le canon de 3 kil., on a

$$a = 0^m,0742 \qquad \text{et} \qquad \frac{M}{m} = 143\ ;$$

il en résulte que

$$\rho = \frac{5 \times 0{,}2 \times 635}{4\pi \times 0{,}0742 \times 100} = 6^m,81\ ;$$

(*) En 1867.

et comme l'âme est longue de $1^m,6$, la flèche sera de $0^m,046$ au centre de l'arc et de $0^m,189$ à l'extrémité.

En prenant toujours $t = 0'',00398$, la vitesse verticale du centre de gravité devient

$$V = \frac{635}{143 \times 6,81} - 0,039 = 0^m,613,$$

laquelle est due à la hauteur de $0^m,019$; tandis que la vitesse du recul est de $3^m,5$ environ.

TABLEAU COMPARATIF *de l'abaissement du projectile, par rapport à la ligne de projection, aux diverses distances.*

CANON DE 3 KIL. Projectile Lenticulaire. Poids: 3 kil. Axes: 0m,1485 — 0m,0971. Charge: 1 kil.		CANON de 8 livres Boulet Sphér. Poids: 8 kil. Diam.: 0m,0936. Charge: 1 kil.	CANON RAYÉ Obus oblong. Poids 3,7 kil. Diamètre 0m,075. Charge 0,55 kil.	FUSIL D'INFANTERIE			
				Projectile lenticulaire. Poids: 20gr,5. Axes: 0m,024 – 0m,006. Charge: 8gr.		Balle sphérique. Poids: 25gr,2. Diam.: 0m,0163. Charge: 8gr.	Fusil rayé Mle 1870. Balle oblongue. Poids: 20gr. Diamètre 0m,01635. Charge: 4gr.
Distances mètres	Abaissements mètres	Abaissements mètres	Abaissem. mètres	Distances mètres	Abaissem. mètres	Abaissements mètres	Abaissem. mètres
200	0,89	0,98	0	100	0,23	0,35	0,2
400	3,72	4,51	3,6	200	1,03	1,95	1,19
600	8,72	11,74	11,4	300	2,55	6,38	3,07
800	16,14	24,38	23,2	400	5,02	17,25	6,05
1000	26,27	44,93	40,0	500	8,73	42,73	10,31
1200	39,47	76,96	61,2	1000	63,73	2804,80	57,64
1400	56,17	125,86	88,2				
1600	76,33	199,15	120,0				
1800	101,38	308,08	156,6				
2000	130,95	469,39	202,0				
3000	373,98	3395,50	552,0				

Comme on a, dans le calcul de ces abaissements, tenu compte de la gravité et de la résistance proprement dite, mais qu'on a négligé l'action de la pression de l'air provenant du mouvement de rotation, il est certain que le projectile lenticulaire aura un avantage encore plus grand que celui qui est indiqué ci-dessus.

(Les deux colonnes relatives au tir du canon rayé de 7c, se chargeant par la culasse, et du fusil rayé, modèle 1870, ont été ajoutées en 1873).

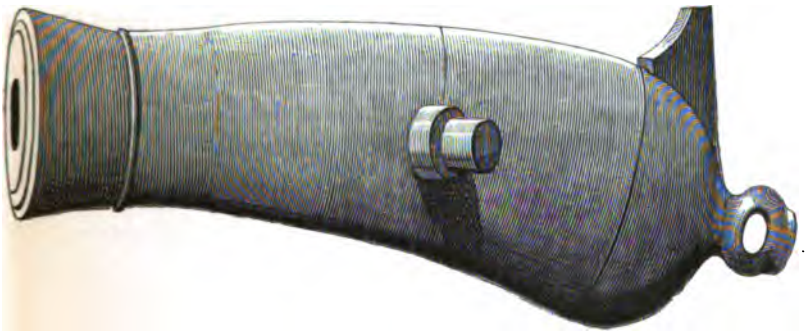
CANON COURBE

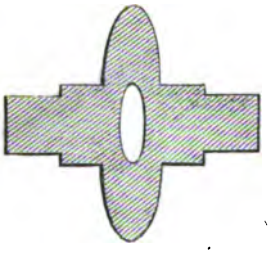
en fonte

PESANT 430 K.

destiné à lancer, avec la charge de 1 kil. de poudre,

un boulet lenticulaire du poids de 3 k.





Section suivant l'axe des tourillons.

CONSIDÉRATIONS SUR LE TIR

DES

ARMES A FEU RAYÉES

DANS LEUR ÉTAT ACTUEL.

Proposition d'un nouveau système de projectiles et d'armes à feu.

(*Journal des Sciences militaires*, 5^me^ série, T. 26. Paris, 1860).

I.

Chaque fois qu'on tire une arme à feu sans rien changer à sa charge et à sa direction, le projectile parcourt un chemin différent.

Concevons que les projectiles lancés par la même arme, dans les mêmes conditions, laissent leurs traces dans l'espace; ces traces, qui sont les *trajectoires* des divers projectiles, formeront un faisceau, une gerbe qui part d'un point unique situé à la bouche de l'arme, et va en s'épanouissant à mesure que la distance augmente.

Il est clair que plus cette gerbe est resserrée, plus les trajectoires dont elle se compose sont rapprochées vers le centre, plus l'arme qui l'a donnée a de justesse.

La gerbe correspondante à une arme à feu étant donnée,

la théorie des probabilités fournit le moyen de déterminer la justesse de l'arme, ainsi que la probabilité d'atteindre un objet de figure, de dimensions et de position données.

Quelles sont les causes qui font que le projectile lancé par une arme à feu décrit à chaque coup une courbe différente?

Ces causes peuvent se ranger en deux classes: celles qui dépendent du tireur; celles qui sont inhérentes à l'arme et au projectile.

On est porté généralement à attribuer au tireur les différences d'un coup à l'autre; cependant, en réalité, les erreurs de pointage n'entrent que pour une très-faible part dans les causes de l'irrégularité du tir.

Si les écarts initiaux dus à l'inhabileté du pointeur étaient les seules causes des déviations, la déviation moyenne serait proportionnelle à la distance. Or, l'expérience montre qu'elle croît plus rapidement que la distance, donc les déviations ne dépendent pas uniquement de la fausse direction imprimée au projectile.

L'expérience nous conduit invinciblement à admettre que chaque projectile est soumis, dans tout le cours de son trajet, à l'action d'une certaine force déviatrice.

Il importe de bien se persuader de cette vérité, car elle est souvent méconnue dans les exercices de tir, même par des hommes spéciaux. On y agit souvent, en effet, comme si le projectile devait immanquablement atteindre le but dès que l'arme est bien pointée. Si un coup porte trop bas, on se hâte au coup suivant d'augmenter l'élévation; si le projectile passe à droite du but, on dirige sur-le-champ l'arme un peu vers la gauche. En agissant de la sorte, on ne fait qu'ajouter des écarts volontaires aux écarts inévitables qui proviennent de la nature même de l'arme, et par là on diminue les chances d'atteindre le but.

Mais quelle est l'origine de la force déviatrice dont toutes les expériences s'accordent à nous montrer l'existence?

Aujourd'hui il est bien avéré que la principale cause des irrégularités du tir est le mouvement de rotation dont le mouvement de translation des projectiles est presque toujours accompagné. Par l'effet des chocs et des frottements qui ont lieu dans l'âme du canon, le projectile prend un mouvement de rotation qui le fait dévier du côté vers lequel se meut son *point le plus antérieur*.

Comme le sens et la vitesse de cette rotation changent d'un coup à l'autre, il arrive que la déviation change aussi à chaque coup de sens et de grandeur.

De ce que le mouvement de rotation du projectile est la cause principale des irrégularités du tir, il s'ensuit que pour obtenir des armes à feu une plus grande justesse, on doit s'attacher à empêcher ce mouvement, ou à le régler. De là deux catégories de moyens à employer pour atténuer les déviations. Ceux de la première catégorie ayant pour but de s'opposer à la rotation du projectile; ceux de la seconde ayant pour objet de produire à notre gré une rotation déterminée.

Les derniers moyens donneront naturellement lieu à des déviations, mais dans un sens déterminé et qui se reproduiront à tous les coups. Il importe de distinguer soigneusement ces déviations permanentes des écarts accidentels qui ont lieu tantôt dans un sens et tantôt dans un autre. On pourrait donner aux premières le nom de *dérivations*, en étendant ainsi la signification de ce mot, adopté dernièrement en France pour désigner les déviations permanentes observées dans le tir des armes carabinées.

La dérivation étant déterminée, pour chaque distance, à l'aide d'épreuves préliminaires, il devient dès lors facile d'en tenir compte dans les coups ultérieurs. On peut même

ne plus avoir à s'en occuper dans le pointage, si l'on dispose la hausse de telle sorte que la ligne de mire s'écarte, à chaque distance, du plan vertical passant par l'axe de l'arme précisément de la quantité qui mesure la dérivation.

La balle Nessler, qui se tire dans les armes à parois lisses, appartient à la première catégorie des moyens qui ont pour objet de diminuer les déviations. Avec cette balle il n'est pas de mouvement de rotation possible dans l'intérieur du canon ; mais dans son trajet, dans l'air, il n'y a rien qui assure la direction de l'axe de la balle.

Nous ne nous arrêterons point sur les moyens qui appartiennent à la première catégorie, parce qu'à notre avis ce ne sont que des palliatifs d'une efficacité assez contestable et d'une valeur bien inférieure aux moyens de la seconde catégorie.

Le premier moyen qui se présente dans cette seconde classe, est celui qui consiste à donner au projectile une excentricité artificielle, et à placer la ligne qui contient le centre de gravité et le centre de figure constamment dans la même position dans l'âme du canon. Par suite de la non-coïncidence des centres de gravité et de figure, la charge de poudre imprime au projectile une rotation autour d'un axe passant par le centre de gravité, et perpendiculaire à la fois à la ligne des centres et à l'axe de l'arme. Le sens de la rotation est tel, que le centre de figure devance le centre de gravité.

Si le projectile est placé dans l'intérieur du canon de manière que le centre de gravité se trouve au-dessus du centre de figure et sur la même verticale, on obtient une rotation telle, que le point antérieur du projectile se meut de bas en haut. Au contraire, si le centre de gravité est placé au-dessous du centre de figure, la rotation du point antérieur a lieu de haut en bas.

On sait que dans le premier cas il y a augmentation de portée, et diminution dans le second.

Le système de l'excentricité artificielle est adopté en Prusse (*). Il exige impérieusement que la ligne des centres soit toujours placée exactement de la même manière dans l'âme du canon; si cette condition n'était pas satisfaite, les variations dans le tir seraient bien plus grandes qu'avec les projectiles ordinaires concentriques. Il est permis de douter qu'on puisse toujours remplir cette condition dans le tir de guerre, à cause de la précipitation inévitable sur le champ de bataille. Quoi qu'il en soit, nous croyons ce système bien inférieur à celui dont nous allons parler.

Pour communiquer au projectile une rotation régulière, on creuse des rayures en hélices dans l'intérieur du canon, rayures que le projectile est obligé de suivre soit en se dilatant, soit au moyen de saillies disposées sur sa surface. Le projectile poussé en avant par l'action de la poudre enflammée, outre son mouvement de translation, prend, par l'effet des rayures, une rotation dont la vitesse dépend de l'inclinaison des hélices par rapport à l'axe du canon.

La forme des projectiles, de sphérique qu'elle était d'abord, devint plus tard allongée.

Les armes à feu rayées, tirées avec des balles allongées, ont donné des résultats très-avantageux, spécialement dans les polygones. Mais dans leur état actuel, elles ne sont pas à l'abri de toute objection, particulièrement les bouches à feu.

Nous allons examiner d'abord les causes de leur supériorité sur les armes à feu des autres systèmes; nous discuterons ensuite les inconvénients qu'elles nous paraissent présenter.

(*) En 1857.

La principale cause de la grande justesse des armes à feu rayées lançant des projectiles oblongs, réside dans la stabilité du mouvement de rotation du projectile, rotation qui a lieu autour de l'*axe principal du plus petit moment d'inertie.* On nous permettra d'entrer dans quelques développements à cet égard.

On sait par la mécanique que les axes principaux d'un corps jouissent des propriétés suivantes :

1° La rotation, qui a lieu autour d'un des trois axes principaux d'un corps qui se coupent à son centre de gravité, continue indéfiniment autour d'un tel axe, sans que cette droite ait aucun point fixe, en supposant que les forces qui sollicitent le mobile passent constamment par le centre de gravité. De sorte que si le corps a, outre sa rotation, un mouvement de translation, l'axe de rotation reste fixe dans le corps et parallèle à lui-même dans l'espace.

Au contraire, si la rotation a commencé autour d'un axe qui n'est pas un des trois axes principaux, l'axe de rotation ne sera qu'instantané, et changera incessamment de position dans le corps et de direction dans l'espace.

2° Quand le corps, par une petite cause étrangère quelconque, prend une rotation autour d'un axe instantané un tant soit peu écarté de l'axe principal auquel répond le plus grand ou le plus petit moment d'inertie, cet axe instantané s'en éloigne très-peu, et ne fait que de très-petites oscillations pendant toute la durée du mouvement.

C'est en cela que consiste la *stabilité* de la rotation autour des axes principaux du plus grand et du plus petit moment d'inertie du corps. Mais la rotation n'est pas également stable pour ces deux axes. Celui dont le moment d'inertie diffère le plus du moment moyen est le plus stable. Ainsi dans un corps de révolution où deux moments

d'inertie sont égaux, il n'y a de stable que l'axe de révolution.

C'est grâce à ces propriétés des axes principaux que la direction de l'axe des projectiles oblongs est assurée pendant leur trajet dans l'air.

L'augmentation de portée des nouveaux projectiles tient à ce que, pour une masse égale, on expose à la résistance de l'air une moindre surface. Les projectiles oblongs ayant, sous une même section transversale, une masse bien plus considérable que les projectiles sphériques, il en résulte que la résistance qu'ils éprouvent de la part de l'air sur l'unité de masse est moindre que celle qu'éprouvent les projectiles sphériques. Or, la quantité dont la vitesse d'un projectile est diminuée dans l'unité de temps, par l'effet de l'air, est précisément égale à la résistance sur l'unité de masse; donc les projectiles oblongs doivent perdre moins de leur vitesse que les projectiles sphériques d'égal calibre et même que ceux de poids égal.

Par exemple, un projectile oblong du poids de 4^k et du diamètre de l'ancien boulet de 4 qui pesait 2^k, éprouve de la part de l'air une résistance, rapportée à l'unité de masse, égale à la moitié de celle qu'éprouve le boulet de 4, en ne tenant pas compte de la différence de forme de la partie antérieure. Or, la résistance sur un boulet rond est proportionnelle à l'aire de son grand cercle, c'est-à-dire au carré du rayon; la masse est proportionnelle au volume, c'est-à-dire au cube du rayon; donc la résistance, rapportée à l'unité de masse, est en raison inverse du rayon pour un boulet sphérique. Par conséquent, le boulet rond qui éprouverait la même résistance, sur l'unité de masse, que le projectile oblong de 4, aurait un rayon double de celui du boulet rond de 4, et serait par suite 8 fois plus

pesant. Il s'ensuit qu'un projectile oblong du calibre de 4 et du poids de 4k surmonte aussi facilement la résistance de l'air qu'un boulet rond de 32 du poids de 16k.

On voit par là l'énorme avantage que présente la forme allongée, avantage qui, pour le dire en passant, dépend bien moins de la plus grande acuité de la partie antérieure que de la plus grande masse sous une même section.

Tels sont les deux principaux éléments de supériorité des nouvelles armes rayées lançant des projectiles oblongs sur les armes lisses à boulets ronds.

Mais, comme nous l'avons dit plus haut, les nouvelles armes, dans leur état actuel, ne sont point exemptes de défauts.

En premier lieu, les armes à feu rayées, en raison des faibles charges avec lesquelles on les tire, — le sixième du poids du projectile et au-dessous, — donnent des feux très-peu rasants ; de telle sorte que l'espace où un fantassin, un cavalier peut être atteint est très-court.

Pour fixer les idées examinons le tir du canon de 4 dont le projectile pèse 4k environ, comparé avec le canon de 8 de campagne dont le boulet pèse également 4k. A l'aide des angles de chute on trouve les résultats suivants :

DISTANCES		MÈTRES							
		300	500	750	1,000	1,500	2,000	2,500	3,000
Espace battu sur un but de 2m.	Canon de 4 rayé charge 1/7	156	95	56	39	21	13	8	5,5
	Canon de 8 lisse charge 1/3	263	119	56	31	11	5	2	1

L'inspection de ce tableau nous montre que le canon rayé a un tir moins rasant que le canon lisse jusqu'à 750^{m}, que c'est le contraire au-delà de 750^{m} ; mais on voit en même temps le peu de chance qu'il y a d'atteindre un but haut de 2^{m},50 au-delà de 1.500^{m} avec le canon rayé.

Dans les polygones où les distances sont parfaitement connues, où il ne peut exister d'incertitude sur la hausse à donner, les armes rayées donnent des résultats très-favorables même à de grandes distances, grâce à la justesse de leur tir ; mais sur le champ de bataille, où les distances sont le plus souvent mal appréciées, les résultats doivent être bien inférieurs.

A la guerre il ne suffit pas d'avoir une arme d'une grande justesse, c'est-à-dire une arme dont le projectile s'écarte peu de la trajectoire moyenne, il faut de plus et surtout que la trajectoire moyenne soit tendue, que l'angle de chute soit petit, de manière à battre un grand espace de terrain.

Qu'importe que le tir ait une grande justesse, si la moindre erreur dans l'appréciation de la distance vous fait manquer le but?

De toutes les qualités d'une arme à feu, celle qui doit être la plus prisée à la guerre est, sans contredit, la qualité de fournir un tir tendu. Or, sous ce rapport, les armes rayées actuelles laissent beaucoup à désirer (*).

Une seconde difficulté que présente l'emploi des nouvelles

(*) Nous avons déjà fait remarquer plus haut, pag. 12, qu'aujourd'hui on est parvenu, à l'aide d'une augmentation de la charge et d'une diminution dans le calibre, à obtenir avec les canons rayés des trajectoires plus tendues que dans les premiers temps de leur introduction. Nul doute cependant que les projectiles lenticulaires ne donnent des trajectoires plus roides que les projectiles oblongs, en raison de la force contraire à la gravité qui naît du mouvement de rotation du bas vers le haut du point antérieur du projectile. (*Note de* 1873).

armes à feu consiste dans le tir à mitraille. On leur a bien donné des boîtes à balles; mais ces balles en choquant les rayures ne peuvent que les dégrader et mettre à la longue la pièce hors de service. De plus, lancée par une faible charge, dans un canon de petit calibre, cette mitraille est sans doute inférieure à la mitraille des anciennes bouches à feu, lancée par la charge du tiers, dans une âme de plus grand diamètre.

Cet inconvénient est fort grave, car il ne faut point que l'artillerie soit exposée à voir ses canonniers fusillés par quelques tirailleurs ennemis sans qu'elle puisse les disperser avec son tir à mitraille, dont l'action doit s'étendre plus loin qu'autrefois, du moment que les carabines ont reçu un accroissement de portée et de justesse.

On nous répondra qu'on peut remédier à l'inconvénient dont nous parlons, en adoptant pour la campagne des bouches à feu d'un calibre plus grand, par exemple d'un calibre égal au canon de 6; mais le projectile pesant alors 6^{k}, on tombera dans l'inconvénient d'augmenter de moitié le poids des munitions, poids déjà bien assez grand à présent.

On se trouve placé ici dans l'alternative, ou d'avoir un calibre trop petit pour un emploi efficace de la mitraille, ou d'avoir un calibre dont les munitions sont trop lourdes (*).

(*) Grâce à divers perfectionnements apportés aux boîtes à balles, tels que: accroissement du nombre et de la densité des balles; plus grande épaisseur des boîtes; soufre fondu entre les balles, etc., on est parvenu à rendre le tir à mitraille des canons rayés égal, sinon supérieur à celui des anciennes bouches à feu lisses. Il paraît néanmoins que les mêmes perfectionnements apportés aux canons lisses leur feraient reprendre la supériorité, non pas à calibre égal, mais à calibre correspondant, c'est-à-dire à projectile de poids égal. Aussi persistons-nous à croire à la supériorité de nos canons pour le tir à balles, comparés aux canons rayés. *(Note de 1873).*

On a fait grand bruit de la puissance de pénétration des nouveaux projectiles. Nul doute qu'aux grandes distances un projectile oblong n'ait une pénétration supérieure à celle d'un boulet sphérique d'égal poids, par suite de la moindre perte de vitesse que lui fait éprouver la résistance de l'air.

On sait que le projectile oblong du calibre de 4 pesant 4^k, lancé avec une vitesse de 370^m, prend à 600^m le dessus, par rapport à la vitesse conservée, sur un boulet rond de 12 (poids 6^k), lancé avec la vitesse de 450^m. A cet égard il importe de remarquer qu'en général ce n'est jamais la force de pénétration qui fait défaut aux boulets ronds, lorsqu'on agit contre des troupes.

Mais aux petites distances, aux distances où l'on fait ordinairement la brèche, où la vitesse initiale n'est pas encore sensiblement diminuée, les projectiles oblongs, lancés avec la charge du sixième et au-dessous, ne peuvent pas donner les effets de pénétration des boulets ronds lancés à la charge du tiers et au-dessus. Il est bon d'éclaircir ce point important.

La théorie prouve et l'expérience confirme que le volume de l'impression, ou, en d'autres termes, que le volume du vide formé par le projectile, est proportionnel à la force vive du projectile. Or, celle-ci, entre des limites assez étendues, étant proportionnelle à la charge, il s'ensuit que le vide, l'excavation formée est proportionnelle au poids de la poudre employée.

Cette loi a été vérifiée pour toutes les charges et pour les différents milieux. De plus, il résulte de l'expérience que, pour ouvrir une brèche donnée, la même quantité de poudre est à peu près nécessaire, qu'on se serve du canon ou de la mine.

Appuyé sur ces résultats de la théorie confirmés par la

pratique, il nous répugne d'admettre qu'avec un simple changement de forme dans le projectile, on puisse diminuer considérablement la quantité de poudre à employer.

Peut-être les tranchées faites au moyen des projectiles oblongs seront-elles un peu plus étroites, de telle sorte que le vide à former, pour ouvrir une brèche donnée, sera un peu plus petit. Peut-être la charge intérieure des projectiles aura-t-elle un peu plus d'efficacité en la faisant agir comme fougasse qu'en l'employant pour communiquer une vitesse au projectile.

Le résultat général des nombreuses expériences faites jusqu'ici avec les canons lisses, c'est qu'il faut en moyenne consommer 50^{k} de poudre par mètre courant de brèche à ouvrir. Nous doutons qu'on puisse avec les canons rayés descendre beaucoup au-dessous de ce chiffre.

Avant de quitter ce sujet nous ferons observer que pour établir une comparaison juste entre les canons rayés et les canons lisses, sous le rapport du tir en brèche, il ne faut point employer dans ceux-ci des charges qui déterminent la rupture des boulets. Assurément, si l'on tire les canons rayés à la charge du septième et même du onzième du poids du projectile, — charge avec laquelle les obus oblongs ne sont point brisés, — et qu'en même temps on emploie la charge de la moitié dans les canons lisses, de manière à produire la rupture des boulets contre des maçonneries dures, assurément, disons-nous, l'avantage restera aux canons rayés. Mais tout le monde sait qu'on peut très-bien faire la brèche à la charge du tiers et au-dessous avec les anciens canons.

Quoi qu'il en soit, il nous paraît qu'on s'est trop promis des nouveaux canons considérés sous le point de vue de la formation de la brèche.

De la discussion dans laquelle nous sommes entré relativement aux difficultés qu'offrent les armes à feu rayées, il ressort que leur défaut capital est celui de ne pas fournir un tir assez tendu. Sous ce rapport elles sont inférieures aux armes lisses pour les distances qui correspondent à la vision distincte.

On pourrait croire au premier abord qu'il suffirait, pour surmonter cette difficulté, d'augmenter les charges de manière à imprimer aux projectiles une plus grande vitesse. Mais ici il se présente un fait inattendu sur lequel nous appelons l'attention du lecteur.

D'après les idées ordinaires sur la résistance des armes à feu à la rupture, on devrait croire que de deux armes de calibre différent et d'épaisseur égale, chargées avec la même quantité de poudre, et des projectiles de poids égal, celle dont le calibre est moindre doit présenter la plus grande résistance. Eh bien, l'expérience prouve que tout au contraire c'est celle du plus petit calibre qui est plus sujette à éclater.

Un fusil d'infanterie du calibre de 17,5 millimètres résiste parfaitement à la charge d'épreuve de 28,2 grammes de poudre; la carabine du calibre de 12,6 millimètres, dont la balle pèse à peu près comme celle du fusil, ne résiste pas à la même charge, quoiqu'elle ait une épaisseur de métal beaucoup plus grande. Il est fort probable qu'un canon de 8 de campagne, foré au calibre de 4, présenterait une moindre résistance que le même canon foré au calibre de 8, toutes les fois que les deux pièces seraient tirées avec la même charge et des projectiles de poids égal.

Quelle est la cause de ce fait singulier? Il nous semble qu'on peut en rendre raison jusqu'à un certain point de la manière suivante.

La rupture du canon dépend de la tension *maximum* des gaz de la poudre. La tension de ces gaz, nulle au commencement de l'explosion de la charge, augmente très-rapidement et arrive bientôt à son *maximum*. Supposons que ce *maximum* ait lieu quand le projectile est déplacé d'un demi-calibre, il est clair que l'espace occupé par les gaz est plus petit dans le canon du plus petit calibre, et par suite la densité des gaz est plus grande. Comme la tension de ces gaz augmente dans un rapport beaucoup plus grand que leur densité, l'effort *maximum* des fluides élastiques sera beaucoup plus grand dans le canon dont l'âme a un plus petit diamètre. La même conclusion subsiste, si au lieu de supposer à un même multiple du calibre le point correspondant au *maximum* de tension, on le supposait à une distance égale dans les deux canons qu'on compare. Pour que la tension *maximum* fût égale de part et d'autre, il faudrait supposer que le point où le *maximum* de tension a lieu est éloigné du devant de la charge d'une quantité en raison inverse du carré du calibre, ce qui est inadmissible.

Quoi qu'il en soit de cette explication, c'est un fait que beaucoup de canons rayés ont éclaté dans les expériences faites en différents pays (*).

On voit par là que l'augmentation des charges aux

(*) Voici des résultats extraits d'épreuves à outrance de bouches à feu en fonte qui viennent à l'appui de notre assertion :

2 canons de 12 résistèrent à :

10 coups avec la charge de	2k	de	poudre	6k,15	de fonte.
10 —	2	—		12 ,30	—
10 —	3	—		18 ,45	—
10 —	3,6	—		24 ,60	—
éclatèrent, un au 2e coup, l'autre au 5e, avec la charge de	6	—		36 ,90	—

canons rayés, pour en rendre le tir plus tendu, n'est pas sans difficulté. Peut-être y parviendra-t-on en changeant de métal, en adoptant l'açier, le bronze d'aluminium, etc.

Affirmer qu'on ne réussira point à vaincre toutes ces difficultés, ce serait être bien téméraire; mais il importe de ne point se dissimuler les objections que soulève l'emploi des canons rayés.

La carabine présente à un moindre degré les défauts des canons, par la circonstance qu'elle n'a pas besoin du tir à mitraille, et qu'on peut lui donner une grande résistance comparativement aux bouches à feu. Tout ce qu'il lui manque, à notre avis, c'est un tir un peu plus rasant et un projectile plus léger.

---

4 obusiers de 15 c. résistèrent à :

4	coups avec la charge de	1k,125	de poudre	12k	de fonte.
1	—	1 ,700	—	15	—
4	—	2	—	12	—
4	—	2 ,550	—	12	—
2	—	2 ,550	—	24	—
5	—	3	—	36	—
2 résistèrent à 5 coups, 2 éclatèrent au 5e avec la charge de		4	—	48	—
2 éclatèrent, un au 1er coup, l'autre au 2e, avec la charge de		6	—	72	—

Canon de 12	Diamètre de la culasse	0m,4400
	— de l'âme	0m,1212
		0m,3188
	Epaisseur	0m,1594
Obusier de 15 c.	Diamètre de la culasse	0m,3800
	— de l'âme	0m,1513
		0m,2287
	Epaisseur	0m,1143

En cherchant bien, nous sommes sûr qu'on trouverait nombre de résultats semblables. Nous ferons, en attendant, observer que les mortiers et les obusiers ont des épaisseurs moindres et des projectiles plus pesants que les canons qui sont tirés aux mêmes charges; pourtant ils sont moins sujets à éclater que ceux-ci. Mais ils ont des âmes de plus grand diamètre: voilà ce qui les sauve probablement.

Nous désirons attirer l'attention des artilleurs sur le fait paradoxal que nous venons de signaler, dont il importe de vérifier l'exactitude.

II.

Frappé des difficultés que présentent les canons rayés, et méditant sur les lois qui régissent le mouvement des projectiles, nous avons été autrefois amené à proposer un nouveau projectile qui, si nous ne nous faisons pas illusion, aurait de grands avantages.

Dans un mémoire en langue italienne qui a paru à Turin au commencement de l'année 1857 (*), nous avons proposé un projectile aplati, de forme lenticulaire, tiré dans une arme à feu dont l'âme serait courbe.

Dans ce système, le projectile est un solide de révolution dont l'axe polaire est moindre que le diamètre de l'équateur, auquel on imprime une rotation autour de l'axe polaire placé perpendiculairement au plan de tir.

Les principaux avantages d'un tel projectile aplati sont:

1° Une grande stabilité de l'axe de rotation. En effet, le mouvement de rotation ayant lieu autour de l'axe principal qui répond au plus grand moment d'inertie, ce projectile aura plus de stabilité qu'un projectile oblong, de poids égal, dont la rotation se ferait autour de l'axe du plus petit moment d'inertie (**). Sous ce rapport un projectile aplati a un grand avantage sur un projectile oblong de même poids.

(*) Voyez le Mémoire précédent.

(**) Voir pour la démonstration de ce principe la note B du Mémoire précédent.

2° Une résistance sur l'unité de masse moindre que pour un projectile sphérique. Un boulet ellipsoïdal dont le grand axe est double du petit, éprouve de la part de l'air une résistance qui est à la résistance exercée contre une sphère de poids égal dans le rapport de 10 à 17 (*). Il s'ensuit que le boulet ellipsoïdal se trouvera, par rapport à la résistance de l'air, dans les mêmes conditions de tir qu'un boulet sphérique cinq fois environ plus pesant. Par exemple un projectile ellipsoïdal du poids de 6 livres (3 kilogr.), aura un tir pareil à celui d'un boulet rond de 30 liv. (15 kilogr.). Si le rapport du grand axe au petit était de 4 à 1, le boulet ellipsoïdal aurait un tir égal à celui d'un boulet rond trente-six fois plus lourd.

3° Si la rotation communiquée au projectile aplati est telle que son point le plus antérieur se meuve de bas en haut, on utilise la force déviatrice que fait naître la rotation pour augmenter la portée, et, — ce qui est d'une plus grande importance, — pour rendre le tir plus tendu.

Les effets de la rotation, pour augmenter la portée, sont plus considérables qu'on ne le croit ordinairement. Afin d'en donner une idée, nous citerons quelques résultats des expériences exécutées par différentes artilleries, que nous extrayons de la *Revue de Technologie militaire* du lieutenant-colonel Delobel, tome II, page 528 et suivantes. Dans ces expériences la rotation de bas en haut du point le plus antérieur du projectile était produite au moyen de l'excentricité, et du placement du centre de gravité au-dessus du centre de figure.

(*) Voir pour le calcul de la résistance la note A du Mémoire précédent.

	PROJECTILE	CHARGE	ÉLÉVATION	ROTATION	PORTÉE	ANGLE de CHUTE
Artillerie suédoise . .	Boulet de 6 livres	2 livres	1°	Nulle.	1.012 aunes	
» . .	»	»	»	De bas en haut.	1.241	
Artillerie hanovrienne	Obus de 24 livres	2 livres 1/2	1°	Nulle.	588 pas	2° 2'
»	»	»	»	De bas en haut.	1.144	1° 27'
»	»	»	3°	Nulle.	1.140	
»	»	»	»	De bas en haut.	3.009	
Artillerie anglaise . .	Obus de 10 pouces	15 livres	28°	Nulle.	4.650 yards	
» . .	»	»	»	De bas en haut.	5.566	

NOTE. Comme il ne s'agit ici que de rapports, on n'a pas réduit en mètres les mesures des divers pays.

On voit par là que le mouvement de rotation de bas en haut engendre une force dont l'effet est opposé à celui de la gravité, force qui n'est pas à dédaigner, et dont il importe de tirer parti pour rendre le tir plus rasant et plus étendu. C'est pour l'utiliser que nous donnons à notre projectile un mouvement de rotation de bas en haut.

Tels sont les principaux avantages que présente la forme aplatie du projectile et sa rotation de bas en haut.

On conçoit que, pour lancer un pareil projectile, il faut que la section droite de l'âme de l'arme soit de même forme que la section méridienne du projectile. Si l'on donne, par exemple, au projectile la forme d'un ellipsoïde aplati, la section de l'âme sera elliptique.

A égalité de poids des projectiles, l'aire de la section de l'âme des nouvelles armes à feu ne sera pas beaucoup plus petite que l'aire correspondante des armes anciennes. De sorte que, pour ce qui regarde le tir à mitraille, les canons à section aplatie seront dans des conditions à peu près égales aux canons à section circulaire, destinés à lancer des boulets ronds, et dans des conditions bien meilleures que ceux qui tirent des projectiles allongés.

Outre cela, l'effort auquel les nouvelles armes doivent résister, par suite du *maximum* de tension des gaz de la poudre, sera bien moindre que l'effort *maximum* qui se produit dans les canons à projectiles oblongs, à cause du plus grand espace que présentent les armes à âme aplatie à l'expansion des fluides élastiques de la poudre.

De là, possibilité d'employer des charges égales à celles qui sont en usage pour lancer les boulets sphériques, et par suite grandes vitesses initiales et trajectoires raides.

A notre avis, on ne saurait trop insister sur les avantages qui résultent du tir rasant. Des artilleurs ont cru

que c'était un progrès que d'appliquer au tir des armes à feu le principe qui consiste à produire la quantité d'action voulue, et à vaincre la résistance de l'air par l'accroissement de la masse et par la diminution de la vitesse. On a doublé le poids des projectiles et l'on a réduit à la moitié le poids de la poudre. De cette manière on en est venu à un tir excessivement courbe, à des feux presque verticaux qui n'atteignent qu'au point de chute.

Ce principe peut être bon dans quelques circonstances particulières, quand on agit contre des vaisseaux ou contre des buts d'une grande étendue à de très-grandes distances. Mais sur le champ de bataille, où il faut atteindre l'ennemi dans le rayon de la vision distincte, le meilleur tir sera toujours le plus rasant.

Rien n'empêche que les projectiles lenticulaires ne puissent être creux et recevoir une charge de poudre intérieure de manière à agir par l'explosion. La disposition presque annulaire dans ce cas de la matière du projectile, sera très-favorable à la stabilité de l'axe de rotation.

La fusée pourra être disposée suivant l'axe de rotation, de manière à en assurer l'inflammation, et à éviter les nombreux ratés auxquels ne sont que trop sujets les obus oblongs actuels.

Il reste à parler du moyen d'imprimer le mouvement de rotation à un projectile aplati. On pourrait en imaginer plusieurs: excentricité du projectile; rayures creusées sur les parois latérales de l'âme qu'on ferait planes, en donnant au projectile la forme d'un disque pourvu d'ailettes en zinc sur ses faces planes, etc. Celui qui nous paraît le meilleur, quoiqu'il présente de plus grandes difficultés de construction que les autres, est le suivant:

Qu'on imagine qu'au lieu de faire, comme à l'ordinaire,

l'âme du canon rectiligne, on la courbe en arc de cercle. Le projectile, poussé par les gaz de la poudre, devant, en vertu de l'inertie, se mouvoir en ligne droite, pressera la paroi — concave dans le sens de la longueur — de l'âme courbe qu'il est forcé de suivre ; cette pression — qu'on désigne en mécanique par le nom de *force centrifuge* — fera naître un frottement contre la paroi elle-même, frottement qui, agissant à l'équateur du projectile, lui communiquera un mouvement de rotation autour de l'axe de figure.

En tournant la concavité de la courbe de l'axe de l'âme vers le bas, il est visible que le mouvement de rotation sera tel, que la partie antérieure du projectile se mouvra de bas en haut.

Eu égard à la grandeur de la vitesse imprimée par la poudre aux projectiles, une courbure assez faible du canon suffira pour produire de grandes vitesses de rotation. Par exemple, une courbure d'un rayon de 15^m dans un fusil communique une rotation de 167 tours par seconde à une balle du poids de 25 grammes, de la forme d'un ellipsoïde aplati, dont les deux axes sont dans le rapport de 2 à 1. Une courbure d'un rayon de 8^m dans un canon imprime une rotation de 100 tours par seconde à un boulet ellipsoïdal pesant 3^k dont le grand axe est double du petit (*).

Ces courbures ne sont point telles, qu'elles puissent rendre le chargement de l'arme trop difficile, ni augmenter trop la hausse.

La vitesse verticale que l'arme acquiert, en raison de la force centrifuge, ne suffit pas non plus pour donner lieu à des inconvénients (**).

(*) Voyez la note D du Mémoire précédent pour la manière de calculer la courbure.
(**) Voyez la même note.

En résumé, les avantages que promet notre système sont:

1° Grande stabilité de l'axe de rotation, par conséquent faibles déviations latérales;

2° Forme du projectile mieux appropriée pour surmonter la résistance de l'air;

3° Utilisation de la force engendrée par la rotation de bas en haut de la partie antérieure du projectile;

4° Vitesses initiales aussi grandes que celles des projectiles sphériques.

Ces trois avantages réunis permettront d'obtenir des trajectoires raides, et par suite un espace dangereux très-étendu;

5° Enfin, tir à mitraille aussi efficace que celui des bouches à feu ordinaires.

Les développements qui précèdent suffisent sans doute pour faire saisir l'idée première de notre proposition. Il n'entre point dans le plan de cet écrit de nous occuper des dimensions à donner aux projectiles et aux armes à feu. C'est au moment d'en venir à une application pratique qu'on pourra les fixer.

Un point important sur lequel nous devons insister, c'est qu'il faut que le projectile au fond de l'âme soit en contact avec la paroi supérieure concave, car, sans cette précaution, il pourrait se produire des battements qui empêcheraient le projectile d'acquérir la rotation voulue. On pourra satisfaire à cette condition en faisant le fond de l'âme légèrement conique, ou par tout autre moyen qui puisse soulever le projectile et l'appuyer contre la paroi supérieure de l'âme lorsqu'il est placé contre la poudre.

Quant au poids des projectiles, nous croyons qu'il importe de ne point dépasser le poids des anciens projectiles sphériques qui étaient déjà bien assez lourds, ni de réduire les

vitesses au-dessous de celles avec lesquelles ceux-ci étaient lancés.

Nous allons maintenant répondre brièvement aux objections qui nous ont été faites depuis la première publication de nos idées.

On nous a opposé que l'axe de rotation du projectile étant parallèle à l'axe des tourillons, il en résultera des déviations latérales toutes les fois que les roues ne seront pas de niveau, déviations qui seront d'autant plus grandes que l'essieu se trouvera plus incliné à l'horizon.

Nous répondons qu'il faut bien faire attention que, malgré son inclinaison, l'axe du projectile se trouve toujours compris dans un plan perpendiculaire au plan de tir, en sorte que le projectile se présente encore de champ à la résistance de l'air et non de plat, ou, autrement dit, le projectile marche *vent debout* et n'est point dévié de côté comme le serait un bâtiment par l'obliquité des voiles.

La déviation produite par une petite inclinaison de l'axe du projectile due à l'inclinaison de l'essieu des roues, n'est pas plus considérable que l'erreur qu'on commet dans le pointage par suite de la même cause, erreur dont on ne se préoccupe guère dans le tir en campagne.

On nous a objecté que le projectile partira suivant la tangente à la courbe convexe inférieure de l'âme, ira choquer la courbe concave supérieure, en sera réfléchi en bas, et fera ainsi une suite de battements, sans acquérir la rotation voulue.

Assurément, si on laisse arriver le projectile contre la paroi supérieure avec une vitesse finie, et sous un angle fini, cet effet pourrait se produire; mais si l'on force le projectile, dans son emplacement initial, à s'appuyer contre la paroi supérieure, il sera contraint à la suivre par

la force centrifuge qui le presse contre elle. Si ce n'était que les gaz de la poudre doivent se développer dans un espace fermé pour produire leur effet, on pourrait supprimer la paroi inférieure du canon, car la paroi supérieure suffirait pour communiquer le mouvement de rotation au projectile.

Une autre difficulté qu'on nous a faite, c'est que si, par une cause quelconque, à la sortie de la bouche du canon, le plan de l'équateur du projectile n'est pas exactement dans la direction même de la vitesse de son centre de gravité, le projectile ne suivra point le plan de tir et donnera une déviation.

Nous ne voyons pas comment le plan de l'équateur du projectile qui est obligé de suivre la partie supérieure de l'âme par une force énorme, telle que la force centrifuge, pourrait sortir du plan de tir. Au reste, la même difficulté se présente dans le tir des projectiles oblongs, c'est-à-dire l'axe de rotation de ceux-ci, en sortant, peut aussi s'écarter, un tant soit peu, de la direction de la vitesse initiale.

Si cela arrivait, il ne faudrait pas croire que le projectile pût se renverser. L'axe de rotation un peu écarté de la normale au plan de tir, prendra un mouvement conique, extrêmement lent, autour de la tangente à la trajectoire décrite par le centre de gravité du projectile. C'est le même mouvement conique que celui que prend toujours l'axe de rotation des projectiles oblongs. Nous avons fait voir dans un écrit récent (*) que l'idée qu'on doit se faire du mouvement des projectiles oblongs lancés par les armes à feu

---

(*) *Etudes sur la trajectoire que décrivent les projectiles oblongs*, 2e partie.

rayées est la suivante : Le projectile tourne sur son axe de figure qui reste immobile dans son intérieur, tandis que cet axe tourne lentement dans l'espace autour de la tangente à la trajectoire.

Nous ne nous arrêterons pas à une difficulté qu'on a élevée, parce qu'elle est fondée sur une erreur. On a dit que l'effet des gaz de la poudre sera moindre sur la surface postérieure d'un projectile aplati, que sur la surface d'un projectile sphérique, et que par suite la vitesse imprimée sera moindre. Mais les auteurs de l'objection oublient que la pression des gaz sur une surface quelconque est indépendante de sa forme, et qu'elle est toujours égale à celle qu'éprouverait la projection de cette surface sur un plan.

Addition de 1873.

Voici un argument qui devait, selon son auteur, renverser de fond en comble tout notre échafaudage. Nous allons le transcrire textuellement : « *La maggiore giustezza dei « tiri dei proietti oblunghi dei cannoni rigati ad elica, « (devesi) alla compensazione ossia neutralizzazione delle « cause perturbatrici, che si stabilisce colla iniziale ro- « tazione loro attorno all'asse di figura sito in quello « stesso del pezzo in direzione della traiettoria, appa- « rendo evidente che l'eccentricità del proietto supposta « a destra dell'asse passando con sufficiente velocità di « rotazione da destra a sinistra successivamente abbiano « i nocivi effetti a neutralizzarsi.*

« *(Al contrario) le cause perturbatrici persistono dalla*
« *stessa parte del meridiano del proietto lenticolare, il*
« *quale inoltre troverassi ordinariamente fuori del piano*
« *verticale siccome il centro di gravità fuori del meri-*
« *diano e dell'asse istesso del proietto e quindi più non*
« *verificandosi il caso teorico nè compensazione alcuna*
« *potendo aver luogo, manca a tale sistema ogni ragione*
« *perchè ne sia assicurata la giustezza dei tiri, qua-*
« *lunque siano le modificazioni apportate e che si pos-*
« *sano apportare* » (*).

Il n'est pas nécessaire de beaucoup de mots pour faire voir que tout ce raisonnement est basé sur une supposition qui est simplement impossible. En effet, il prend pour point de départ la supposition que l'axe de rotation d'un projectile, lancé par une arme rayée, puisse se conserver constamment tangent à la trajectoire. Or, nous demandons: — Quelle est la force qui fait à chaque instant changer la direction de l'axe de rotation?

Si la résultante de l'action du milieu sur tous les points de la surface du projectile passait constamment par son centre de gravité, il est clair que l'axe de figure du projectile se conserverait parallèle à lui-même pendant tout le

(*) La plus grande justesse du tir des projectiles oblongs des canons rayés en hélice (est due) à la compensation ou neutralisation des causes perturbatrices, qui s'établit par leur rotation initiale autour de l'axe de figure, lequel coïncide avec l'axe de la pièce dans la direction de la trajectoire. En effet, il est évident que, si l'excentricité du projectile est à droite de l'axe, en passant successivement, avec une vitesse suffisante de rotation, de droite à gauche, les effets nuisibles doivent se neutraliser.

(Au contraire), dans un projectile lenticulaire, les causes perturbatrices persistent du même côté du méridien (c'est probablement *équateur* qu'on a voulu dire) qui se trouvera, en outre, ordinairement en dehors du plan vertical, de même que le centre de gravité qui se trouvera hors du méridien *(équateur ?)* et de l'axe même. De sorte que le cas théorique ne se vérifiant plus, ni aucune compensation pouvant avoir lieu, il n'y a plus aucun motif pour que dans ce système la justesse du tir soit mieux assurée, quelles que soient les modifications apportées ou qu'on puisse y apporter.

cours du mouvement; c'est-à-dire qu'il serait toujours parallèle à sa direction primitive, qui est celle de la tangente à la trajectoire au point de départ.

Ainsi l'axe de figure du projectile s'écarte d'autant plus de la tangente à la trajectoire qu'il s'éloigne davantage de l'origine. Mais, si la résultante des résistances exercées sur tous les points de la surface ne passe pas constamment par le centre de gravité, ce qui est le cas ordinaire, l'axe de figure du projectile prendra un mouvement conique autour de la tangente à la trajectoire, et viendra par suite se présenter obliquement à la résistance de l'air, qui le fera sortir du plan vertical de projection, en donnant lieu à cette déviation permanente qui a reçu le nom de *dérivation*. Ce mouvement conique, analogue à celui qui produit la précession des équinoxes, a été signalé dès 1852 par Henri-Gustave Magnus et a été étudié ensuite par nous (*) et par M. le général Mayewski qui, dans son *Traité de balistique extérieure*, paru tout récemment, fait voir que, dans le cas de vitesses un peu considérables, l'axe de figure ne fait pas une révolution entière autour de la tangente à la trajectoire pendant le trajet du projectile, mais qu'il exécute un mouvement d'oscillation autour de la tangente et que l'amplitude de ces oscillations est toujours moindre que deux angles droits.

Il paraît que l'auteur de l'objection dont il s'agit n'a pas cru devoir tenir compte de ces travaux et qu'il s'appuie toujours sur les idées qui avaient cours, il y a une quinzaine d'années, et d'après lesquelles on croyait pouvoir, au moyen de quelques vagues notions de mécanique,

(*) Voir le tome I de ces mémoires.

expliquer le mouvement des projectiles, lancés par les armes rayées.

Aujourd'hui qu'il est bien prouvé que l'axe de figure d'un projectile doué, au point de départ, d'un mouvement de rotation autour de cet axe ne peut pas se conserver, dans son cours ultérieur, constamment tangent à la trajectoire, il reste démontré que la prétendue compensation qui devrait avoir lieu autour de l'axe de rotation ne saurait en aucune manière exister. En effet, si par suite de l'irrégularité du projectile, une force perturbatrice est appliquée en un point situé sur la partie antérieure d'un projectile, lancé par une arme rayée, ce point aura beau passer de droite à gauche ou de bas en haut, la force qui y est appliquée tendra toujours à relever la pointe du projectile. Le contraire aura lieu si la force perturbatrice est appliquée à la partie postérieure du projectile. Il faut noter que tant dans le premier, que dans le second cas, la force perturbatrice n'aura pas pour effet de mouvoir l'axe dans sa direction, comme cela arriverait si le mobile n'avait aucune rotation, mais qu'elle forcera l'axe à décrire un cône autour de sa direction même.

Un projectile oblong lancé par une arme rayée, n'est pas, sous ce rapport, en meilleure condition qu'un projectile lenticulaire doué d'un mouvement de rotation autour de son axe de figure. En effet, si une force perturbatrice agit sur ce dernier en un point en dehors de son équateur, elle tendra à faire dévier l'axe de rotation et à lui faire décrire un cône autour de sa direction.

Il est bien essentiel d'être prévenu que même si, par impossible, on parvenait à rendre constamment tangent à la trajectoire l'axe de figure d'un projectile oblong, lancé par une arme rayée, cet axe ne serait pas toutefois l'axe

de rotation, car l'axe instantané de rotation ne saurait rester immobile dans le projectile sans rester également immobile dans l'espace. Nous renvoyons le lecteur, pour plus de détails sur ce point, au Traité de Cinématique de M. Edm. Bour (*).

Enfin on nous a objecté les grandes difficultés de construction pour obtenir un canon à la fois elliptique et courbe.

Sans nous dissimuler ces difficultés, nous pensons que l'industrie, dans son état actuel, surmonte des difficultés bien autrement graves, et que le jour où ce problème lui sera posé elle ne tardera pas à le résoudre.

Il nous semble qu'on pourrait commencer par forer le canon en ligne droite au diamètre du plus grand cylindre droit inscriptible dans l'âme courbe du canon, pour agrandir ensuite le trou au moyen d'un rabot qui agirait longitudinalement suivant un arc de cercle.

Quoi qu'il en soit de la valeur attachée à ces objections par quelques personnes, l'expérience seule pourra prononcer souverainement sur un tel sujet; mais une expérience faite avec intention de réussir: nous voulons dire une expérience où l'on ne se décourage pas au moindre insuccès, et où rien ne soit négligé pour introduire, au fur et à mesure que l'occasion s'en présentera, les modifications que la pratique pourra suggérer.

Nous n'osons espérer que le système que nous proposons puisse être de sitôt exécuté et expérimenté. Nous savons que

(*) *Cours de Mécanique et de Machines, professé à l'Ecole polytechnique. Premier fascicule: Cinématique*, p. 104. Paris, 1865.

toute nouveauté paraît longtemps une impossibilité. Quelques personnes nous traiteront de rêveurs; cependant nous avons foi dans l'idée mère de notre proposition, parce qu'elle repose sur des principes théoriques incontestables, et, si nous ne nous abusons, on en tirera parti quelque jour.

Avant de terminer nous devons, par esprit de justice, ajouter que depuis la publication de notre proposition, en 1857, nous avons appris, par la *Revue* de M. Delobel citée plus haut, que des propositions analogues, bien que basées, par leurs auteurs, sur des principes différents, mais aboutissant aussi à un projectile aplati, avaient été faites en Angleterre par M. Woolcombe, officier de santé de l'armée britannique, en Belgique par M. de Puydt, capitaine de l'artillerie belge. « C'est, » comme le dit très-bien l'inventeur belge, dans son mémoire inséré dans la *Revue de Technologie militaire, tome II*, « un exemple de plus « à ajouter à tous ceux que présente déjà l'histoire des arts « et des sciences relativement à l'invention réelle et simultanée d'une même chose en divers pays et par des hommes « entièrement inconnus les uns aux autres. »

M. de Puydt est le seul qui soit parvenu à faire expérimenter son système par l'artillerie de son pays: les résultats qu'il a obtenus n'ont pas été favorables, non pas sous le rapport du tir, mais quant à ce qui regarde la résistance des projectiles et du canon; à notre avis, il n'y a point à s'en étonner. En effet, dans le système belge le projectile a la forme d'un disque, le canon est rectiligne, et la rotation est engendrée par une forte excentricité. Or, le mouvement de rotation ayant lieu autour du centre de gravité qui se trouve en dehors de l'axe du canon, il doit arriver que le projectile en tournant choque avec violence les parois de l'âme, de manière à se briser lui-même ou à briser

la pièce; c'est là ce qui explique les nombreux disques qui se sont brisés dans l'âme et la rupture du canon. Aux dernières expériences exécutées avec ce système, si nous sommes bien informé, sur cinq coups tirés, les quatre premiers disques se sont brisés; aú cinquième coup le canon a éclaté, le projectile est parti et a donné une portée prodigieuse.

Jusqu'à ce qu'on trouve mieux, nous croyons la courbure du canon préférable à tout autre moyen pour communiquer le mouvement de rotation aux projectiles lenticulaires.

Addition de 1873.

En réfléchissant de nouveau sur le sujet des projectiles lenticulaires, que nous avions mis de côté depuis longtemps, il nous est venu quelques idées qui pourraient, si nous ne nous abusons, faciliter beaucoup la solution du problème. Nous allons les exposer brièvement

Nous proposons que le projectile soit entouré à l'équateur par un anneau ou une crête faisant saillie sur la surface; que le canon rectiligne se chargeant par la culasse soit pourvu de deux rayures droites placées l'une à la partie supérieure de l'âme d'une section correspondante à la section de l'anneau ci-dessus, l'autre à la partie inférieure, d'une section plus large et de profondeur égale à la hauteur de l'anneau.

On introduit le projectile dans le canon en engageant l'anneau dans les rayures de l'âme. Au moment de l'inflammation de la charge et du départ du projectile, le

frottement de l'anneau dans la rayure supérieure lui communiquera un mouvement de rotation tel, que la partie antérieure se mouvra de bas en haut.

Le projectile pourra avoir une enveloppe en plomb, brasée au zinc, de dimensions légèrement moindres que celles de l'âme. L'anneau d'un métal plus dur que le plomb, faisant saillie sur l'enveloppe pénétrera dans les rayures et assurera le mouvement du projectile.

CANON RECTILIGNE

SE CHARGEANT PAR LA CULASSE

destiné à lancer un projectile lenticulaire.

Section du canon.

Section du projectile.

Projectile vu de côté.

Ce moyen d'imprimer le mouvement de rotation aux projectiles lenticulaires pourrait s'adapter aux canons lisses ordinaires à âme circulaire.

Pour des expériences préliminaires destinées à constater les avantages de la rotation du projectile autour de l'axe perpendiculaire au plan de tir, correspondant au plus grand moment d'inertie, on pratiquerait dans le projectile sphérique, un vide intérieur de la forme d'un ellipsoïde de révolution, dont le grand axe serait assez différent du diamètre perpendiculaire. De la sorte, le moment d'inertie du projectile autour de cet axe surpasserait les moments autour des autres axes et assurerait la stabilité du mouvement de rotation du projectile autour du même axe. L'anneau devrait être placé perpendiculairement au grand axe de l'ellipsoïde.

Un canon lisse à âme circulaire, dans lequel on aurait tracé les deux rayures dont nous avons parlé plus haut, pourrait servir à lancer ce projectile qui, bien que sphérique à l'extérieur, serait néanmoins mécaniquement équivalent à un projectile sphéroïdal aplati.

Pour faciliter l'introduction du projectile dans la pièce, la rayure supérieure devra s'élargir et s'approfondir vers la bouche. La rayure inférieure devra être plus profonde que la saillie de l'anneau sur le projectile ; mais elle ira en se rétrécissant, et les côtés en seront divergents vers le fond, de manière à faire remonter le projectile et à le forcer lors du chargement.

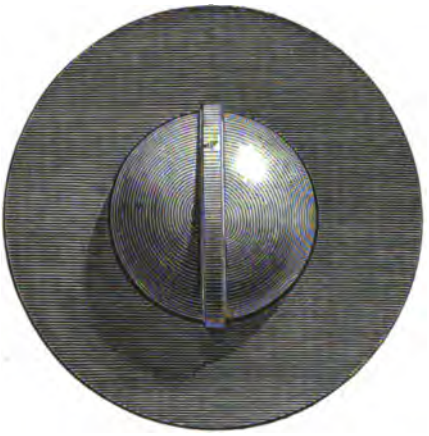
CANON RECTILIGNE

SE CHARGEANT PAR LA BOUCHE

destiné à lancer un obus sphérique

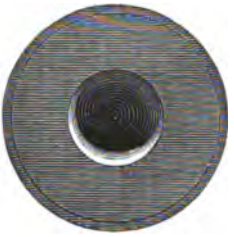
avec cavité ellipsoidale.

Tranche de la bouche avec projectile à l'entrée.



Section du canon avec projectile au fond contre la charge.

Section du projectile suivant l'axe polaire.



Section équatoriale du projectile.

Nous nous arrêtons ici, notre but étant simplement de donner une idée générale du nouveau moyen que nous avons imaginé pour imprimer la rotation aux projectiles lenticulaires. Ce n'est que par des essais successifs qu'on pourra fixer les meilleures dimensions à donner à l'anneau, la matière la plus convenable et une foule d'autres détails techniques. (*Addition de 1873*).

DE LA POUDRE.

DE LA

FABRICATION DE LA POUDRE

CONSIDÉRATIONS ET PROPOSITIONS.

PRÉFACE.

Avant 1852, toutes les poudres, tant de guerre que de chasse et de mine, se fabriquaient en Piémont par le procédé des pilons.

Malgré l'exemple de la plupart des Etats où ce mode de fabrication suranné avait été remplacé par des procédés plus rationnels, on continuait à s'en servir en s'appuyant sur l'exemple de la France où l'on était revenu aux moulins à pilons, en abandonnant le procédé, dit *révolutionnaire*, imaginé à l'époque de la première révolution, pour subvenir au pressant besoin de poudre. Ce dernier procédé, proscrit en France, passa, avec quelques modifications, en Prusse où il est encore employé aujourd'hui.

L'explosion de la poudrerie de Turin, arrivée le 26 avril 1852, rendit indispensable la construction d'une autre fabrique, dans un endroit plus convenable et pourvue d'appareils perfectionnés. C'est à cette époque que nous fîmes paraître les considérations et les propositions dont nous publions ici la traduction (*). Les principes qui y sont développés ont été adoptés, en grande partie, dans la nouvelle poudrerie de Fossano élevée vers l'année 1861, pour la fabrication de toutes sortes de poudres.

Le gouvernement italien ayant renoncé depuis au monopole des poudres, on ne fabrique plus aujourd'hui dans les établissements de l'Etat que de la poudre de guerre par le procédé des tonnes et de la presse que nous avions proposé.

Turin, février 1873.

(*) *Della fabbricazione della polvere da fuoco. Considerazioni e proposte.* Stamperia Reale. Torino, 1852. Traduit en allemand par le lieutenant-colonel TEICHERT : *Ueber Bereitung des Schiesspulvers. Betrachtungen und Vorschläge.* Berlin, 1853.

I.

REVUE RAPIDE DES PRINCIPAUX PROCÉDÉS SUIVIS AUJOURD'HUI POUR FABRIQUER LA POUDRE.

On peut réduire à cinq les modes les plus usités de fabriquer la poudre, savoir :

Procédé des pilons;
» des meules;
» des meules et de la presse;
» des tonnes;
» des tonnes et de la presse.

1.

Procédé des pilons.

Tout le monde connaît ce procédé. La pulvérisation, le mélange et la compression des trois matières premières s'opèrent, par ce mode, en même temps.

On lui reproche les défauts suivants:

D'être long et de donner par conséquent peu de produits;

D'exiger une grande puissance mécanique (la fabrication d'un kilogramme de poudre exige la dépense d'un travail mécanique égal à 153.900 kilogrammètres (*));

De nécessiter un grand nombre d'ouvriers (40 ouvriers pour la production de 100^{k} de poudre par heure);

De nécessiter une grande quantité d'eau d'arrosage, ce qui rend la poudre poreuse (**);

De fournir des produits peu homogènes (***);

De fournir des poudres manquant de la consistance nécessaire pour résister aux transports.

Le procédé des pilons n'est plus usité que dans les pays les moins avancés dans l'industrie. Cependant il est encore employé en France pour la fabrication des poudres de guerre, parce qu'on y croit généralement que les poudres des autres procédés plus parfaits amènent plus promptement la destruction des armes à feu et sont, comme on dit, *brisantes*.

Il ne nous paraît pas qu'on puisse tirer cette conclusion des expériences faites à cet égard en France. En effet, les expériences d'Esquerdes, en 1831-32, n'ont conduit à aucun

---

(*) Nous avertirons, une fois pour toutes, que ces nombres représentant le travail mécanique nécessaire pour fabriquer un kilogramme de poudre, de même que le nombre d'ouvriers, ne sont qu'approximatifs. Il existe à cet égard une différence trop grande entre les diverses poudreries pour pouvoir établir avec précision ces deux données. Ceux que nous rapportons, sont déduits de ce qui se pratique dans les principales poudreries d'Europe. S'ils ne sont pas entièrement exacts, ils peuvent au moins, jusqu'à un certain point, servir à comparer entre eux les divers modes de fabrication.

Les travaux mécaniques indiqués sont censés mesurés sur l'arbre du *récepteur*.

(**) La poudre, en s'humectant, prend plus de volume, et ne le perd point en se desséchant; ce qui accroît la rapidité de l'inflammation, mais détruit sa densité, et lui donne *une force passagère et illusoire*. GASSENDI, *Aide-Mémoire*, 5^{me} édition, p. 689.

(***) Le mode des pilons est vicieux, par l'irrégularité de densité et de composition qu'il donne aux poudres; car *le hasard est son seul régulateur*. Idem p. 668.

résultat définitif (*); de sorte que chaque procédé a conservé ses partisans.

Les expériences de Metz, en 1836-37, firent voir seulement que les poudres très-denses, tandis qu'elles impriment de grandes vitesses aux projectiles, causent une plus prompte destruction des bouches à feu en bronze. C'est l'effet de l'espace plus petit occupé par les gaz de la poudre, dans les premiers moments de leur expansion, et par suite l'effet de leur plus grande force élastique.

Comme avec le procédé des pilons la densité de la poudre ne peut pas dépasser une certaine limite assez peu élevée, même en prolongeant la durée du battage et en lissant beaucoup les grains, il en résulte que les poudres des pilons sont moins nuisibles aux armes que les poudres des meules, à cause de la plus grande densité de ces dernières. Mais rien n'empêche de donner la densité qu'on voudra aux poudres des autres procédés, surtout aux poudres des tonnes et de la presse dont nous parlerons plus loin.

Au surplus, les mêmes expériences françaises firent voir qu'on peut, par un moyen simple, rendre inoffensives les poudres les plus énergiques, tout en ne renonçant pas à leurs grands effets balistiques ou à l'économie qui en résulterait, si l'on se contentait des effets moindres que fournissent les poudres peu denses. Ce moyen consiste dans l'emploi de gargousses allongées, dont l'effet est d'augmenter l'espace que le boulet laisse en arrière de sa

---

(*) On trouve textuellement dans les rapports officiels, auxquels ces expériences ont donné lieu: « Après un examen attentif du travail fait à Esquerdes, la Commission « n' a pu reconnaître ce qu' il y avait à faire, soit aux machines des divers procédés, « soit à la manière de les employer, pour éviter ou atténuer les causes des effets brisants. » Ailleurs on lit: « Quoiqu'il ne soit sorti des expériences d'Esquerdes aucun « résultat d'une application immédiate, etc. » Piobert, *Mémoire sur les poudres de guerre des différents procédés de fabrication*, 1844.

position, et de diminuer, par là, la force élastique des premiers gaz développés par la poudre.

Les expériences de Bapaume, en 1852, sur la manière de faire la brèche, révélèrent un fait digne d'être noté, savoir: que tandis qu'avec la charge du tiers du poids du boulet, les vitesses initiales et les dégradations des bouches à feu sont proportionnelles aux densités gravimétriques de la poudre, le contraire a lieu avec la charge de moitié du poids du boulet; c'est-à-dire qu'à la charge de la moitié, les poudres moins denses deviennent les plus fortes et les plus destructives, propriétés qui vont toujours ensemble. Sans vouloir attribuer une trop grande importance à ces résultats d'une expérience isolée, il est bon de faire remarquer qu'il est loin d'être prouvé, ainsi que quelques personnes le croient, qu'on ne peut toucher aux moulins à pilons sans causer la ruine de toutes les bouches à feu.

Le fait est qu'en Angleterre, en Belgique, en Prusse, en Suède, en Russie, etc., les moulins à pilons n'existent plus, et néanmoins les armes n'y durent pas moins qu'en France.

La poudre des pilons, même après un battage prolongé, n'a jamais la consistance nécessaire pour résister aux transports sans souffrir, à moins qu'on ne la comprime au moyen de la presse avant de la grener.

Pour toutes ces raisons le procédé des pilons doit être, selon nous, complètement abandonné.

2.

Procédé des meules.

Dans quelques pays la poudre est à la fois triturée, mélangée, arrosée et mise en galette, par la seule opération

du moulin à meules; dans d'autres, les trois composants sont triturés séparément sous les meules, et sont ensuite mélangés et comprimés sous une autre meule.

Ce procédé, surtout sans la trituration préliminaire, est d'une grande simplicité, et fournit de très-bons résultats pour les poudres fines. Des expériences nombreuses ont démontré que la poudre d'*une* heure de trituration sous les meules est de beaucoup supérieure à celle de *quatorze* heures de battage sous les pilons (*).

A côté des avantages d'exiger peu d'eau pour l'arrosage et de fournir des poudres compactes et de qualité excellente, les meules présentent les inconvénients:

D'exiger un travail mécanique assez considérable (410.400 kilogrammètres par kilogramme de poudre (**));

D'être sujettes aux explosions. Le moindre grain de sable siliceux qui se rencontre sous les meules suffit pour produire l'explosion (***).

(*) Maguin, *Expériences d'Esquerdes, en* 1833-34.

(**) On se tromperait si, en comparant ces chiffres aux chiffres relatifs au procédé précédent, on croyait que les meules dépensent un plus grand travail mécanique que les pilons, à parité de bonté de la poudre. Il faut avoir égard à ce que le degré de pulvérisation et de mélange d'une heure avec les meules est supérieur à celui de quatorze heures avec les pilons. Nous en avons une preuve par ce qui se pratique à la poudrerie de Wetteren en Belgique, où chaque meule mue par un seul cheval, à la vitesse de 2 à 3 tours par minute, fournit 25 kil. de poudre en 4 heures.

Un cheval, dans de telles circonstances, développe un travail de 40 kilogrammètres par seconde environ; de sorte que, toutes les autres circonstances étant égales, à Wetteren, on dépense seulement 99.900 kilogrammètres par kilogramme de poudre.

Nul doute que cette poudre qui coûte seulement les 2/9 de travail mécanique, comparée aux poudres anglaises, ne soit inférieure, sous le rapport de la mixtion, à ces dernières qui sont travaillées le même espace de temps, sous des meules faisant 8 à 10 tours par minute.

(***) Toutes les fois que des grains de grès (quartz siliceux), même le plus mou, se sont rencontrés sous les meules, il y a eu explosion; quelques grains de sable de grès aussi fin que la poudre royale, placés sous les meules avec de la poudre, font dans certaines circonstances explosion presque à tout coup au premier tour de meule. *Rapport du 8 mai sur des épreuves faites au Bouchet.*

3.

Procédé des meules et de la presse.

Ce procédé est le seul employé en Angleterre. Les trois composants sont d'abord pulvérisés séparément à l'aide des meules; ils sont ensuite mélangés, en les faisant tourner, dans une tonne contenant des gobilles; et enfin incorporés et comprimés sous une meule. En sortant de la meule, la galette n'est point grenée immédiatement; mais elle est concassée au moyen de deux cylindres dentés. Une presse hydraulique sert à former une seconde fois la galette qui est enfin grenée à l'aide d'une machine pourvue de cylindres dentés.

Le mode anglais de fabrication fournit des poudres supérieures aux poudres des meules simples. Le grain en est plus dur et plus dense, et par suite se conserve mieux. La galette ayant une densité plus uniforme dans toute sa masse, la poudre a plus de régularité dans ses effets balistiques. Ces derniers sont, à parité de circonstances, plus grands; car on sait qu'une poudre s'améliore par le simple fait d'être réduite de nouveau en poussière, et d'être refaite. La forme lamellaire du grain, qu'on obtient avec le grenoir anglais, favorise singulièrement la vitesse de l'inflammation et de la combustion.

Selon nous, la grande renommée, dont jouissent à juste titre les poudres anglaises, est due à cette forme lamellaire des grains. Nul doute que la pureté des composants que les Anglais soignent beaucoup, n'y contribue aussi, de même que l'homogénéité résultant des diverses manipulations.

Le procédé anglais a, comme le précédent, l'inconvénient d'être sujet aux explosions, et d'exiger la dépense d'un grand travail mécanique (437.400 kilogrammètres par kilogramme de poudre).

4.

Procédé des tonnes.

Les ingrédients de la poudre sont triturés deux à deux (charbon et soufre, charbon et salpêtre) dans des tonnes tournantes, par le choc et le frottement de gobilles métalliques; ils sont ensuite réunis et mélangés dans d'autres tonnes renfermant aussi des gobilles; et enfin grenés par agglomération dans une autre tonne.

Les avantages de ce procédé sont :

D'être rapide;

D'exiger un travail mécanique moindre que tous les autres procédés (54.000 kilogrammètres par kilogramme de poudre);

D'exiger un nombre d'ouvriers moindre que tous les autres procédés (7 ouvriers par 100 kilogrammes à l'heure);

D'être moins sujet aux explosions que les autres.

La poudre ronde qu'il fournit convient particulièrement aux mines. La forme et la porosité du grain la rendent peu propre à la guerre et à la chasse. Bien qu'on puisse en faire usage dans les bouches à feu, elle est, dans les petites armes, plus faible que les poudres anguleuses.

La poudre ronde est employée en France pour les mines à l'exclusion de toute autre.

5.

Procédé des tonnes et de la presse.

A l'époque de la première révolution française, quand la France eut à faire face à toute l'Europe, le procédé des pilons ne pouvant, à cause de sa lenteur, suffire à l'approvisionnement de plusieurs armées, Carny et Chaptal (*) imaginèrent le procédé, dont nous allons parler. On l'a abandonné par la suite en France, à cause de quelques défauts dans le mode de compression, qu'on peut éviter facilement dans l'état actuel de l'industrie. En effet, il a été adopté en Prusse à la suite d'une série de nombreuses expériences.

Les opérations pour fabriquer la poudre par ce procédé se réduisent à triturer les ingrédients isolément ou combinés deux à deux; à les mélanger dans les proportions convenables dans des tonnes tournantes, au moyen de

---

(*) Un journal militaire français (*a*), en annonçant la première édition de cet écrit, a cru que nous nous étions trompé en attribuant à Carny et à Chaptal l'invention du procédé révolutionnaire. D'après ce journal il serait dû à Champy (*b*), et Chaptal y aurait eu peu de part. Qu'il nous soit permis, pour nous justifier, de citer les propres paroles de Chaptal: « C'est surtout à Carny qu'on doit la découverte et l'application « du procédé *révolutionnaire* pour la fabrication de la poudre: j' ai apporté quel- « ques changements avantageux dans les détails des opérations, dans la préparation « des matières, dans la construction des tonneaux, etc., mais je m' honore de rendre « à Carny l'hommage qu' il mérite: le premier, il a proposé et exécuté cette méthode; « et depuis cé moment, on n'a pu y ajouter que quelques degrés de perfection » (*c*).

(*a*) *Spectateur militaire*, 2e série, 27e année, 4e vol. 1832, p. 114.

(*b*) Le baron Champy est l'inventeur de la poudre ronde (1813), dont nous avons décrit la fabrication ci-dessus.

(*c*) *Éléments de Chimie*, 3e édition. Paris, an V, t. I, p. 298.

gobilles métalliques; à donner au mélange la consistance nécessaire au moyen d'une petite quantité d'eau et d'une presse. La compression s'opère en Prusse d'une manière continue à l'aide d'un laminoir.

Ce procédé est à coup sûr le plus rationnel, puisque la trituration et le mélange s'opèrent sur toutes les parties, mêmes les plus petites, et la compression peut être portée aussi loin qu'on veut.

Il demande moins de travail mécanique que tous les autres (116.100 kilogrammètres par kilogramme de poudre) et moins d'ouvriers (30 ouvriers par 100 kilogrammes de poudre à l'heure); excepté toutefois le procédé des tonnes seules, où il n'y a pas de compression, et où les grains se forment par couches successives et concentriques.

Les diverses opérations en sont peu dangereuses. L'homogénéité et la densité de la poudre peuvent être variées à volonté.

Il nous paraît préférable à tout autre pour la fabrication des poudres de guerre et de chasse, parce qu'il est facile, simple, économique, expéditif et capable de donner de bons produits.

Si dans le mode employé en Prusse, on substituait au grenoir français dont on fait usage, le grenoir anglais, nous croyons qu'on aurait de la sorte le procédé le plus parfait possible.

II.

CONSIDÉRATIONS SUR QUELQUES POINTS TOUCHANT LA FABRICATION DE LA POUDRE.

1.

De la fusion du salpêtre.

En Angleterre, le salpêtre après le raffinage est fondu et coulé dans des moules de forme convenable. Cette opération le rend plus facile à transporter, à placer dans les magasins, et moins exposé à se mélanger avec des matières étrangères. Le salpêtre en fusion, avant d'être complétement refroidi, est mou et reçoit facilement, comme la cire, des empreintes: de manière qu'on peut imprimer sur chaque pain le poids, ou toute autre marque jugée utile.

Bien que le salpêtre ne contienne pas d'eau de cristallisation, il existe néanmoins toujours entre les cristaux une certaine quantité d'eau interposée, qu'on expulse à l'aide de la fusion. Les substances organiques qui peuvent quelquefois en altérer la pureté, sont également éliminées à la température de la fusion (350° C).

La fusion du salpêtre présente enfin un avantage important, en ce qu'elle diminue le travail mécanique à dépenser pour la fabrication de la poudre. Quelque petits que puissent être les cristaux, ils sont difficiles à triturer, et exigent un travail considérable pour être réduits en une

poussière impalpable. La fusion change la texture intérieure du salpêtre et le rend plus facile à pulvériser.

Il nous paraît donc que dans la fabrication de la poudre, le salpêtre fondu, connu autrefois sous le nom de *sel de prunelle* ou *cristal minéral*, est à préférer au salpêtre en petits cristaux, tel qu'on l'emploie aujourd'hui.

Si l'on adopte cette opération, il faudra naturellement, dans l'essai du salpêtre, non-seulement en vérifier la pureté par rapport aux chlorures, mais s'assurer encore s'il ne s'est pas décomposé dans la fusion, c'est-à-dire, s'assurer s'il n'a pas laissé dégager une partie de son oxigène en se transformant en azotite ou en potasse.

2.

Du charbon.

En général, on donne la préférence au bois de bourdaine (*Rhamnus Frangula*, LINNÉ) pour faire le charbon destiné à la poudre. Nous ne croyons pas que cette préférence soit bien justifiée. Le fait est qu'on peut employer pour le même objet tous les bois légers donnant un charbon facilement inflammable, tels que les tiges de chanvre, le fusain, le saule, l'aune, le coudrier, etc.

Il convient de couper le bois dans sa séve, c'est-à-dire, lorsque l'ancienne séve s'est changée en bois, et que la nouvelle est encore liquide. Le bois est dépouillé de l'écorce, parce qu'elle est plus chargée de cendres que le bois lui-même.

Il est bon d'exposer le bois à l'air et aux pluies qui dissolvent la séve et l'entraînent, de sorte qu'à la fin il ne reste plus que la fibre ligneuse. On peut y parvenir plus rapidement en faisant bouillir le bois dans l'eau.

L'emploi des chènevottes dispense de cette opération qui peut devenir coûteuse en raison des grands approvisionnements qu'elle nécessite. La macération que l'on fait subir au chanvre en emporte toute la séve.

Autrefois on pouvait objecter à l'introduction des chènevottes la difficulté de les convertir en charbon sans les réduire en cendres avec les méthodes de carbonisation alors usitées ; mais aujourd'hui, au moyen de la distillation en vases clos, ou encore mieux au moyen de l'action d'un courant de vapeur d'eau surchauffée, cette difficulté disparaît complétement.

En Piémont, il y a même avantage sous le rapport de l'économie à employer les chènevottes pour la poudre.

Enfin le charbon de chènevottes a l'avantage précieux d'être très-combustible et de se laisser aisément pulvériser.

Pour toutes ces raisons, il nous semble que de tous les charbons celui de chènevottes est le plus convenable pour la fabrication de la poudre.

On admet en général la supériorité de la distillation simple, ou mieux encore de la distillation à l'aide de la vapeur surchauffée, sur les anciennes méthodes de carbonisation. En effet les nouvelles méthodes offrent l'avantage de permettre de pousser plus ou moins loin la carbonisation d'une manière uniforme dans toute la masse du bois.

Si l'on est à peu près d'accord sur la supériorité des nouvelles méthodes de carbonisation, les opinions sont très-divisées quant au degré auquel l'opération doit être poussée. En France, par exemple, pour les poudres de chasse, on arrête la carbonisation au point où le bois prend une couleur rousse. Au contraire, en Angleterre, où l'on a appliqué pour la première fois la distillation à la carbonisation du bois pour la poudre, on n'emploie que le

charbon noir. Il en est de même en Prusse où le rendement du bois en charbon est de 25 pour 100.

On croit en général que le charbon roux, à cause de sa grande inflammabilité, convient spécialement aux petites armes, mais qu'il rend les poudres offensives dans les bouches à feu. Cependant des expériences exécutées au pendule balistique n'ont point montré de grandes différences entre les poudres fabriquées avec des charbons de natures diverses.

3(*).

Du dosage.

Les proportions des trois composants de la poudre doivent être telles, que le charbon se combine à tout l'oxygène du salpêtre, et le soufre à tout le potassium. Les combinaisons du charbon avec l'oxygène qui peuvent se former au moment de l'explosion, sont au nombre de deux : l'oxyde de carbone (CO) et l'acide carbonique (CO^2); les combinaisons du soufre avec le potassium sont nombreuses : le monosulfure (KS), le bisulfure (KS^2), etc. (**).

L'expérience a démontré que la proportion qui fournit une plus grande puissance balistique est celle avec laquelle le carbone se transforme complétement en acide carbonique. Bien que le volume des gaz produits soit plus grand quand il se forme de l'oxyde de carbone, toutefois

---

(*) On a omis ici de traduire un paragraphe relatif aux raffineries du salpêtre et du soufre, parce qu'il ne renfermait que des considérations sur des pratiques locales lesquelles ont changé depuis.

(**) Il nous a paru bon de conserver dans la traduction la nomenclature chimique et les notations employées dans le texte italien, afin de nous faire comprendre du plus grand nombre de personnes. *(Note de 1873).*

l'expansion est moindre, parce que la température s'élève moins, et qu'une partie du carbone échappe à la combustion.

Si le charbon était du carbone pur, la proportion la plus convenable serait : (*)

1 équivalent de nitre . . .	102 . . .	75,0
3 équivalents de charbon . .	18 . . .	13,2
1 équivalent de soufre . . .	16 . . .	11,8
Total	136 . . .	100,0

Et la réaction chimique serait représentée par la formule :

$$KO, NO^5 + C^3 + S = 3\,CO^2 + N + KS.$$

Le nitre et le soufre qu'on emploie dans la fabrication de la poudre peuvent être considérés comme purs. Il n'en est pas ainsi du charbon qui renferme toujours de l'hydrogène, de l'oxygène, de l'azote et des sels terreux et alcalins.

Des recherches de M. Violette ont fait voir que le charbon renferme du carbone en quantité proportionnelle à la température de la carbonisation : à 250°, il contient 65 pour 100 de carbone ; à 300°, 73 pour 100 ; à 400°, 80 pour 100 ; au delà de 1.500°, 96 pour 100 environ. Même aux températures les plus élevées qu'on ait pu obtenir, telle que la température de la fusion du platine, on n'a pu le transformer en carbone pur (**).

(*) Les équivalents des corps simples employés ici sont les suivants :

Équivalent de l'hydrogène	$H = 1$
» du carbone.	$C = 6$
» de l'oxygène	$O = 8$
» de l'azote ou nitrogène . .	$N = 14$
» du soufre	$S = 16$
» du potassium (*kalium*) . .	$K = 40$

(**) Violette, *Mémoire sur les charbons de bois. Technologiste*, 12e année, p. 568.

Puisque la composition du charbon dépend de la manière dont on l'obtient, il est clair que le dosage de la poudre ne peut être établi sans connaître d'avance la nature chimique du charbon.

Les charbons fabriqués par les procédés ordinaires offrent une très-grande variété dans leur composition; de manière que les poudres, quoique dosées numériquement toujours de la même manière, peuvent présenter de grandes différences.

L'introduction d'un procédé de carbonisation, fournissant des charbons renfermant toujours la même quantité de carbone, serait un véritable progrès, puisqu'il donnerait des poudres homogènes entre elles. Un procédé qui paraît remplir cette condition est celui proposé par M. Violette, qui consiste à plonger le bois dans de la vapeur d'eau surchauffée. Les charbons qu'on en obtient, présentent plus de régularité dans leur composition : on peut faire à volonté des cuites entières de charbon roux à 70 pour 100, ou des cuites de charbon très-noir à 88 pour 100.

La quantité de charbon à faire entrer dans la poudre dépend de sa nature chimique. Soit un charbon composé de la manière suivante:

a équivalents de carbone;
b — d'hydrogène;
R, poids des matières qui ne peuvent prendre part à la réaction. Ce sera l'oxygène et l'hydrogène dans les proportions pour former l'eau, et les matières minérales qui composent les cendres.

Afin que la réaction résulte complète on devra prendre:

Nitre $(2a+b)$ (KO, NO^5).. 102 $(2a+b)$..... 51
Charbon 6 $(C^a H^b R)$..... 6 $(6a+b+R)$..9 $+\frac{3(R-2b)}{2a+b}$
Soufre $(2a+b)$ S..... 16 $(2a+b)$..... 8

et alors on obtiendra :

$$(2a+b)\ (KO, NO^5) + 6\ (C^a H^b R) + (2a+b)\ S$$
$$= (2a+b)\ (KS+N) + 6\,b\ (HO) + 6\,a\ (CO^2) + 6R.$$

La proportion du charbon croît à mesure que le titre du charbon en carbone diminue, et décroît à mesure que la quantité de l'hydrogène libre augmente. Cette proportion est toujours plus forte que 9 sur 68 ou, en d'autres termes, que 13,2 sur 100, car R n'est jamais nul, et de plus il est toujours plus grand que $2b$.

Autrefois on employait en Prusse un dosage très-voisin de celui que donne la théorie lorsqu'on suppose le charbon formé de carbone pur. Ce dosage était de 75 nitre, 13,5 charbon, 11,5 soufre. Le dosage employé à présent en Prusse : 74, 16, 10, ainsi que l'anglais : 75, 15, 10, sont beaucoup plus convenables et ne doivent guère s'écarter de celui qu'on trouverait en faisant une analyse exacte du charbon. On emploie dans ces deux pays le charbon noir. Or, on peut supposer qu'un tel charbon est composé de :

80,00 carbone ;
3,33 hydrogène libre ;
16,67 cendres, hydrogène et oxygène dans les proportions de l'eau.

100,00

Cette composition correspond aux valeurs suivantes :

$$a = 4,\quad b = 1,\quad R = 5.$$

D'après ces données la poudre doit être composée de:

salpêtre	51	ou bien	73,9
charbon	10	—	14,5
soufre	8	—	11,6
	69		100,0.

Si l'on remplaçait le charbon noir par du charbon roux renfermant 70 pour 100 de carbone, le résultat ne serait guère différent. En effet, si d'un côté, en diminuant le titre du charbon, on doit en augmenter la proportion, de l'autre côté comme ce charbon contient une plus grande quantité d'hydrogène libre, il faudra en diminuer la proportion; de sorte qu'il y aura à peu près compensation.

Quelle que soit la nature chimique du charbon, le rapport entre les deux quantités de salpêtre et de soufre doit être comme les deux nombres 51:8. C'est pourquoi la poudre prussienne aussi bien que la poudre anglaise ne renferment pas assez de soufre, de manière qu'une partie de la potasse doit échapper à la réaction: ce qui est nuisible pour différentes raisons. L'oxygène de cette partie de potasse ne se dégageant pas, le volume du gaz acide carbonique se trouve diminué d'autant; de plus, cette potasse fixe une partie de l'acide carbonique et, par là, diminue de nouveau les produits gazeux. Il se forme enfin un produit solide, le carbonate de potasse, qui encrasse l'arme.

La poudre française et l'italienne, au dosage de 75, $12\frac{1}{2}$, $12\frac{1}{2}$, renferment trop peu de charbon, d'autant plus que des trois ingrédients, le charbon est celui dont il se fait une plus grande déperdition pendant la fabrication.

En ce qui concerne l'habitude d'avoir deux dosages, l'un

pour la poudre de guerre, l'autre pour la poudre de chasse, nous ne savons guère en voir l'avantage, à moins que ce ne soit la conséquence de l'emploi de deux charbons divers. En Angleterre, où l'on ne fait pas usage de charbon roux, il existe un seul dosage et les poudres contenant plus du 75 pour 100 en salpêtre sont considérées comme mauvaises.

Le dosage de la poudre de mine ne devrait pas non plus différer de celui des poudres de guerre et de chasse. En diminuant la quantité de salpêtre dans les poudres de mine, on perd en puissance plus qu'on ne gagne sur le prix de revient.

Suivant le mot du célèbre Montgolfier: *La force vive est celle qui se paie*, c'est-à-dire le prix d'un moteur doit être évalué en proportion de la force vive, ou du travail mécanique, qu'on en retire. Or les prix de revient des deux poudres de guerre et de mine sont dans un rapport moindre que celui des travaux qu'elles développent (*).

C'est donc une mauvaise spéculation que d'employer la poudre de mine au lieu de la poudre de guerre (**).

La poudre de mine a en outre l'inconvénient grave de dégager un gaz délétère. On sait en effet, que non-seulement l'oxyde de carbone ne peut pas entretenir la respiration des animaux, mais qu'il agit comme un

---

(*) D'après les expériences de Bapaume, les effets des poudres de guerre et de mine sont, à poids égaux, dans les mines, dans le rapport de 33 à 25 (1); tandis que les prix de revient étaient, en 1852 en Piémont, dans le rapport de 33 à 30.

(**) Dans la relation des expériences de Bapaume, on lit: « Si l'on était dans le « cas d'employer de la poudre de mine (dans les mines militaires), on ferait bien d'y « ajouter un simple mélange de nitrate de potasse ou de soude, comme l'a indiqué « M. Combes », et cela dans le but de transformer en acide carbonique l'oxyde de carbone qui se formerait.

---

(1) *Expériences de Bapaume*, p. 264.

véritable poison, tandis que l'acide carbonique quoique également impropre à la respiration, n'exerce pas cependant une action délétère sur les organes.

Dans les pays où la fabrication de la poudre est l'objet d'un monopole de la part du gouvernement, comme on y prélève un droit considérable sur la poudre de chasse, on cherche à préparer une poudre de mine telle, qu'elle ne puisse pas remplacer cette dernière. Aussi y prépare-t-on une poudre de mine qui a beaucoup moins de force, et qui encrasse rapidement les armes (*).

4.

De la trituration.

De toutes les opérations dont se compose la fabrication de la poudre, la trituration des matières premières est celle qui absorbe une plus grande quantité de travail mécanique et de temps. La réussite des autres opérations dépend en grande partie de la perfection plus ou moins grande de la trituration. Il est donc de la plus grande importance de chercher la manière de la rendre, autant qu'on peut, facile et prompte.

L'instrument destiné à opérer la trituration doit être proportionné à la grosseur des parties à diviser. Afin d'avoir la moindre perte possible de puissance, il convient de se servir de l'action de corps dont la masse soit en

(*) Dans le percement du grand tunnel du col de Fréjus, on n'a employé, d'après notre conseil, que de la poudre de mine au dosage de la poudre de guerre. *(Note de 1873).*

rapport avec la petitesse des parties qu'on veut réduire en poudre. Ainsi, on commencera la trituration des ingrédients en les réduisant en fragments de moyenne grosseur, au moyen d'un marteau ; après quoi, on poursuivra l'opération en écrasant ces fragments soit sous une meule, soit entre deux cylindres tournant en sens opposé, soit dans un moulin à noix semblable aux moulins à café; enfin, on perfectionnera la trituration, en faisant tourner la substance à pulvériser dans une tonne renfermant des gobilles métalliques.

En proportionnant de la sorte les moyens à la grosseur des parties à triturer, on éprouvera une perte de force vive bien moindre que si l'on employait un procédé unique. En effet, lorsqu'on fait usage des seuls pilons, ou des seuls cylindres, il arrive qu'après un certain temps, les matières déjà divisées formant une couche, la plus grande partie de l'action de la machine est détruite par la mollesse de la masse des particules superposées; et, arrivé à un certain point, il devient presque impossible de pousser plus loin la pulvérisation. Pour atteindre une division extrême, il faut opérer séparément sur chaque particule; ce qui s'obtient au moyen des gobilles métalliques qui, en se choquant et se frottant sans cesse au milieu d'une atmosphère de particules, agissent sur chacune de celles-ci et les réduisent à une ténuité extrême.

Si l'on employait les tonnes de trituration dès le commencement, c'est-à-dire lorsque les parties sont encore grossières, il est clair que les gros fragments seraient difficilement pulvérisés par les petites gobilles, et qu'il en résulterait une perte de puissance mécanique et de temps.

En résumé, le salpêtre et le soufre en pains seront brisés grossièrement par des marteaux ; ils passeront ensuite dans un moulin ; enfin la pulvérisation en sera achevée dans

des tonnes tournantes, par des gobilles métalliques. Le charbon sera d'abord pulvérisé dans le moulin et ensuite dans les tonnes. Si le charbon est de chènevottes, on le pulvérisera immédiatement dans les tonnes.

5.

De la formation de la galette.

Pour donner au grain de la poudre la solidité nécessaire, on arrose la matière sèche avant de la comprimer. Or, il est démontré que l'eau est le plus grand ennemi de la poudre; et l'on peut dire que la bonté de la poudre est en raison inverse de la quantité d'eau qui a été employée dans sa fabrication.

L'eau d'arrosage dissout le salpêtre et, en s'évaporant, lors du séchage, le fait effleurir à la surface du grain et forme une croûte qui diminue notablement la combustibilité de la poudre.

Sous ce rapport, le procédé des pilons, à cause de la grande quantité d'eau d'arrosage dont il a besoin, est très-inférieur aux autres procédés, surtout au procédé des tonnes et de la presse, qui permet d'employer la quantité d'eau qu'on veut.

Il serait à désirer d'avoir un moyen de former sans eau, avec les trois composants de la poudre, triturés et mélangés à sec, des galettes assez consistantes pour se convertir en grains. Ce moyen pourrait être l'emploi simultané de la compression et de la chaleur. Dans le n° III du *Mémorial de l'Artillerie*, on lit, dans la note *B* d'un *Mémoire sur la force de la poudre* par M. Colson, la phrase suivante:

« Des poussiers secs comprimés à la température de 50 à 60 « degrés Réaumur, produisent une masse compacte d'une « densité, d'une consistance et d'une dureté considérables, en « quelque sorte arbitraires, et pouvant atteindre à la dureté « de la pierre. On a reproché à la poudre provenant de ce « procédé d'être trop peu poreuse et trop dense; mais on « peut faire varier la densité en variant la pression et la « température; on peut aussi remédier à l'excès de densité « en diminuant la grosseur des grains ».

Nous pensons qu'il y a dans cette idée le germe d'un progrès important dans l'art de fabriquer la poudre. Des expériences dans ce sens pourraient conduire à de bons résultats.

A propos des effets pernicieux de l'humidité, il est bon de noter que le lissage de la poudre peu essorée contenant de 4 à 5 pour 100 d'eau, en diminue la puissance. Le lissage n'est favorable à la puissance de la poudre qu'à la condition que la poudre soit presque sèche, contenant moins de 1 $^1/_2$ à 2 pour 100 d'eau.

Le moyen suggéré par M. Colson de faire prendre corps aux ingrédients pulvérisés, pour pouvoir les réduire en grains, à l'aide de l'élévation de température, a quelque analogie avec une proposition adressée, en 1801 et 1802, au Comité militaire de Madras par le lieutenant Bishop (*). Dans le but de rendre la poudre inaltérable à l'humidité, M. Bishop propose de l'exposer à la température de 500° F. (260° C.), lorsqu'elle est arrivée au dernier degré de fabrication, et cela pour en expulser toute humidité et faire entrer le soufre et le nitre en fusion. La poudre refroidie après cette opération a changé de couleur et du gris a

(*) Braddock — *Memoir on Gunpowder*, § 135 *ter* et *quater*.

passé au noir mat; le grain est devenu très-dur et, étant exposé à l'humidité, ne l'absorbe plus et reste inaltéré.

Nous ne croyons pas qu'on ait jamais pratiqué en grand ce moyen de dessication qui paraît assez dangereux, attendu que la température de 500° F. (260° C.) n'est guère éloignée de celle de 600° F. (316° C.) à laquelle la poudre prend feu.

6.

De la grosseur, de la forme et de la densité des grains.

L'expérience a démontré, qu'entre certaines limites, le dosage de la poudre et les manipulations qu'elle a subies n'ont qu'une influence secondaire sur ses effets; et que sa puissance dépend surtout de ses qualités physiques, c'est-à-dire de la grosseur, de la forme et de la densité des grains.

On ne doit pas s'en étonner ; en effet, la quantité des gaz dégagés à chaque instant et, par suite, leur force élastique est intimément liée à ces qualités.

Plus les grains sont petits, plus grande est la surface de tous les grains pris ensemble et plus petit est le temps nécessaire à la combustion de chacun. Pour ces raisons, la force élastique des gaz est plus forte au commencement du phénomène de l'explosion. D'un autre côté les interstices entre les grains diminuent, de sorte que l'obstacle au passage de la flamme croît et, par suite, le temps nécessaire à l'inflammation de la charge est plus grand. Ce qui est une cause de diminution de force élastique.

Si la poudre est anguleuse, l'espace qu'elle occupe croît à mesure que les grains en sont plus petits; c'est l'inverse pour la poudre ronde. Dans le premier cas, la petitesse

des grains est suivie d'une diminution de force élastique des gaz, dans les armes sans chambre, et d'une augmentation dans les armes avec chambre. Le contraire a lieu pour une poudre ronde.

Quant à la forme des grains, il est évident que les grains sphériques offrent moins de prise à la flamme que les grains anguleux, de manière que l'inflammation en est plus lente. Mais la forme ronde rend le jeu de la flamme plus facile entre les grains, en raison de la régularité des interstices.

Plus les grains ont des arêtes vives et approchent de la forme lamellaire, plus l'inflammation en est rapide, et plus le temps de la combustion de chacun est petit. Mais d'un autre côté, la poudre anguleuse laisse des interstices irréguliers, et il arrive, lorsque le grain en est inégal, qu'une partie des interstices est remplie par les grains plus petits; de là des entraves à la libre circulation de la flamme.

Une autre circonstance à noter quant à la forme sphérique, c'est que la surface de chaque grain est un minimum. Il en résulte une quantité moindre de gaz dans les premiers moments de la combustion.

En ce qui concerne la densité des grains, il est clair que plus elle est grande, moins grande est la quantité des gaz dégagés au commencement. En effet, pour une charge de même poids, composée de grains de même grosseur, plus la densité des grains est forte, plus le nombre en est petit, et la surface totale petite.

Mais le volume de la charge résulte moindre, de manière que la force élastique et les effets des gaz sont augmentés, si le projectile touche la charge, et sont diminués, s'il existe une chambre.

Assurément, il n'est pas facile de déterminer l'influence simultanée de toutes ces causes qui agissent dans divers sens. Le moyen le plus sûr est de consulter l'expérience. Or cette dernière nous enseigne que dans les armes portatives et dans les bouches à feu avec de petites charges, la diminution de grosseur des grains est constamment accompagnée d'un accroissement d'effet. La même chose a lieu pour la densité, c'est-à-dire que les poudres moins denses ont l'avantage sur les plus denses; mais cette cause agit avec une moindre intensité que la grosseur.

L'influence des qualités physiques se fait beaucoup moins sentir dans les grandes charges. Dans les bouches à feu les différences entre les diverses poudres sont de peu d'importance ; de là est venu l'adage qu'*il n'y a point de poudre faible pour le canon*, adage qu'il ne faut pourtant pas prendre trop à la lettre. En effet, toutes les poudres n'impriment pas la même vitesse initiale au projectile dans le même canon ; mais les différences sont petites et bien moindres que celles qui se manifestent dans les armes portatives qui sont beaucoup plus sensibles aux qualités de la poudre. La raison en est que, à cause de la grande quantité de chaleur dégagée par les grandes charges employées dans le canon, les grains sont consumés avant la sortie du projectile de l'arme.

Par conséquent, n'ayant égard qu'aux effets balistiques, il importe peu que la poudre à canon ait le grain gros ou fin, que la densité du grain soit forte ou faible, que la forme du grain soit ronde ou anguleuse. Mais il n'est point indifférent pour la conservation des bouches à feu que la poudre soit plus ou moins offensive, car les pièces en bronze, faute de dureté, se déforment facilement, et celles en fonte sont exposées à éclater.

Comme on l'a déjà dit, les poudres qui détériorent davantage les armes ce sont les poudres denses. Ainsi les poudres d'une densité moyenne sont celles qui conviennent aux bouches à feu, si l'on ne préfère pas se servir des charges allongées pour tempérer les propriétés brisantes des poudres denses, sans renoncer aux grands effets balistiques qu'elles fournissent. D'après Piobert, le chargement avec des gargousses allongées atténue généralement des $\frac{4}{5}$ les détériorations produites par le chargement ordinaire dans les canons, sans que les vitesses initiales des projectiles soient diminuées (*).

Le procédé des tonnes et de la presse a, selon nous, le grand avantage de fournir des poudres de la densité qu'on croit la plus convenable, ainsi que toutes les autres qualités physiques qu'on désire; tandis que les variations qu'on peut obtenir dans les caractères physiques de la poudre fabriquée à l'aide des pilons sont très-restreintes.

Il doit exister, pour chaque arme, une combinaison de grosseur, de densité et de forme du grain, qui satisfait le mieux à la condition de procurer la plus grande puissance balistique compatible avec la résistance de l'arme. Ainsi, dans le fusil, les poudres fines et vives sont supérieures aux autres; tandis que, dans le canon, les poudres denses et soigneusement dépouillées du poussier ont l'avantage. Mais la simplicité qu'on ne doit jamais perdre de vue dans les choses touchant à la guerre, ne permet certes pas d'avoir autant d'espèces de poudres qu'on a d'armes diverses, et même elle nous prescrit de restreindre le plus qu'il est possible les espèces de poudres de guerre.

(*) Piobert, *Mémoire sur les poudres de guerre.*

Autrefois on avait une seule poudre de guerre, mais cela aux dépens de l'efficacité des feux d'infanterie. Aujourd'hui on emploie, dans presque tous les pays, deux espèces de poudre, dont l'une à gros grain sert pour les bouches à feu, l'autre à grain fin est destinée aux armes portatives. Dans quelques pays on ajoute une troisième poudre plus fine pour les carabines. Cependant la différence entre ces poudres doit être limitée par la condition de pouvoir, au besoin, se servir de chacune d'elles pour une arme quelconque.

L'artillerie prussienne, qui a beaucoup étudié la question des poudres, s'écarte assez des autres pays par rapport à la grosseur. On n'a en Prusse que deux espèces de poudres de guerre: de canon et de fusil, et cette dernière sert aussi à la carabine. Mais la grosseur des grains y est notablement moindre qu'ailleurs, comme il résulte du tableau suivant:

		Sardaigne(*) et France millim.	Angleterre et États-Unis millim.	Prusse millim.
Poudre à canon	sur-égalisoir	2,5	2,5	1,2
	sous-égalisoir	1,4	1,8	0,7
Poudre à fusil	sur-égalisoir	1,4	1,8	0,7
	sous-égalisoir	0,6	1,3	0,4
Poudre à carabine	sur-égalisoir	0,6	0,9	0,7
	sous-égalisoir	0,1	0,6	0,4

(*) Aujourd'hui en Italie les dimensions des grains sont à peu près les mêmes qu'en Prusse (1873).

Ainsi en Prusse la poudre à canon est à peu près de la grosseur de la poudre à fusil des autres pays, et la poudre à fusil est semblable à la poudre à carabine.

Il faut noter qu'en Prusse tant la poudre à canon que la poudre à fusil sont lissées longuement.

La pratique prussienne a pour effet d'accroître l'efficacité du tir de l'infanterie sans diminuer celui du canon, dans lequel, comme on l'a indiqué plus haut, la grosseur du grain a peu d'influence sur les effets. Elle nous semble donc digne d'imitation, d'autant plus si l'on a égard au tir des mortiers et, en général, des bouches à feu tirant à petites charges, tir qui a beaucoup perdu depuis qu'on y emploie la poudre à gros grains.

La poudre à canon anglaise, quoique d'un grain assez gros, ne doit pas avoir le défaut de fournir de faibles portées, lorsqu'elle est employée à petites charges, parce que sa forme très-anguleuse en accélère grandement la combustion (*).

(*) Depuis quelques années, on a introduit, outre la poudre à fusil et à canon, une nouvelle poudre pour les bouches à feu rayées de gros calibre. Cette poudre est à grains très-gros tantôt ronds, tantôt prismatiques ou cylindriques. On a même essayé des charges formées d'un seul grain. Quelquefois les grains sont percés de trous, surtout lorsqu'ils sont prismatiques et très-gros; alors les gaz qui y pénètrent les font éclater et les réduisent en un grand nombre de petits grains. Le but qu'on se propose avec ces poudres c'est de ménager les bouches à feu.

Voici les données que nous avons pu recueillir concernant les poudres à gros grains:

Angleterre. Poudre *pebble* (caillou). Grains compris entre 12,7 et 19 millim. Densité: 1,75 à 1,78.

Autriche. Poudre prismatique à base hexagonale, avec 7 trous cylindriques. Côté de l'hexagone: 17 mill. Hauteur du grain: 24,1. Diamètre des trous: 4 mill. Poids du grain: 26gr, 25. Densité: 1,6.

Belgique. Poudre à gros grains compris entre 13 et 16 mill. Densité: 1,77. Poids: 9gr, 73.

Italie. Poudre à grains cubiques. Côté: 10 mill. Densité: 1,8. Poids: 2 grammes.

Prusse. Poudre prismatique. Poids de 38 à 39 grammes.

Russie. Poudre prismatique à base hexagonale, à 7 trous cylindriques. Côté de l'hexagone: 20,3 mill. Hauteur du grain: 25,4 mill. Diamètre des trous: 5 mill. Densité: 1,61 à 1,66. Poids: 35 grammes. *(Addition de 1873).*

7.

Du lissage.

Le lissage des grains est utile sous le double rapport de la conservation et de la puissance de la poudre. Les poudres non lissées se détériorent dans les transports, attirent l'humidité et sont sujettes à s'agglomérer, surtout en restant enfermées longtemps dans des gargousses. Elles s'allument plus facilement que les poudres lisses et dépouillées du poussier; mais la transmission de la flamme à la totalité des grains y est plus lente en raison du poussier qui obstrue les interstices entre les grains. La partie postérieure de la charge en combustion, avant que le feu ait pu parvenir à l'autre extrémité, chasse devant elle le projectile, et le restant de la charge, laquelle, en brûlant dans un espace plus grand, exerce une action moindre sur le projectile. Au contraire, si les grains sont bien lissés, la charge exigera des moyens plus énergiques pour être allumée, la flamme se transmettra avec facilité à tous les grains, envahira presque instantanément tout l'espace occupé par la poudre, et la durée de la combustion de la charge ne sera plus que le temps nécessaire pour consumer un grain (*).

(*) La poudre anglaise de commerce, surtout celle qui est destinée pour l'Afrique, est rendue brillante comme l'argent, au moyen de l'addition d'une certaine quantité de graphite dans les tonnes de lissage. La couche de graphite qui se forme à la surface des grains doit en diminuer l'inflammabilité; mais elle peut, jusqu'à un certain point, contribuer à leur conservation. Dans quelques poudreries françaises, on mélange à la poudre de chasse à lisser de gros grains de poudre arrosés avec le 12 pour 100 d'eau. Cette humidité doit dissoudre un peu de salpêtre, qui se dépose ensuite sur la surface des grains en leur donnant un lustre micacé. Cette pratique ne peut qu'être nuisible à la vitesse de l'inflammation de la poudre.

8.

Du séchage.

Bien que dans nos climats, on puisse profiter de la chaleur des rayons solaires pour sécher la poudre, cependant pour une fabrication continue, on ne peut se passer d'un séchoir artificiel.

Il est très-important, pour la bonne qualité de la poudre, d'éviter de l'exposer brusquement à une température trop élevée; en effet, la vapeur d'eau qui se forme à l'intérieur du grain peut, en se frayant un passage, rompre le grain et le rendre poreux, en privant ainsi la poudre des deux propriétés principales qu'elle doit posséder, c'est-à-dire de résister aux transports et à l'humidité.

Les procédés en usage pour sécher la poudre sont tous plus ou moins entachés de ce défaut. A la vérité, il se fait moins sentir dans les pays où l'on emploie peu d'eau dans la fabrication de la poudre, comme par exemple en Angleterre, où la poudre arrive au séchoir avec moins de 1 $^1/_2$ pour 100 d'eau.

De plus, le séchage nuit à la beauté de la poudre, en lui faisant perdre une partie de son lustre.

A notre avis, le seul procédé qui conserve à la poudre toutes ses bonnes qualités, est celui dans lequel on fait évaporer l'eau, par le moyen de l'air non chauffé, desséché et mis mécaniquement en mouvement.

Par ce procédé la poudre est mise en contact avec une atmosphère desséchée d'avance, et sans cesse renouvelée.

On peut dessécher l'air au moyen du chlorure de calcium

qui peut être ramené à l'état solide par la chaleur, et servir indéfiniment.

Dans le *Traité de la chaleur* de Péclet, t. II, p. 137, 2e édition, on trouve la description d'un appareil de dessication, fondé sur ce principe, qui pourrait servir de point de départ pour projeter un séchoir destiné à la poudre.

9.

De l'épreuve de la poudre.

Il y a longtemps que l'insuffisance du mortier-éprouvette, pour la réception des poudres, est démontrée. Cet instrument classe souvent les poudres dans un ordre inverse que le canon. Les poudres peu denses y ont l'avantage sur les poudres denses qui, au canon, fournissent les plus grandes vitesses.

Toutes les fois qu'on a voulu augmenter la portée de réception du mortier-éprouvette, on a dû diminuer la durée du battage de la poudre, et par suite sa dureté et sa densité.

Le mortier-éprouvette doit donc être absolument proscrit.

L'éprouvette naturelle de chaque poudre est l'arme même à laquelle on la destine.

A l'aide du pendule balistique ou électro-balistique, on peut obtenir la vitesse imprimée au projectile avec chaque arme, et le recul de l'arme. La moitié de la force vive du projectile qu'on en déduit, mesurera la puissance balistique de la poudre, et la moitié de la force vive du recul mesurera, jusqu'à un certain point, l'effet de la poudre sur l'arme.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES PROCÉDÉS QU'ON PROPOSE POUR FABRIQUER LES DIVERSES ESPÈCES DE POUDRE.

Après avoir examiné les principaux procédés qu'on suit aujourd'hui pour fabriquer la poudre, et indiqué quels sont les perfectionnements conseillés par la théorie et par la pratique, il est bon, pour fixer les idées, de donner une description sommaire des procédés que nous proposons pour la fabrication des diverses espèces de poudre. Tel est le but du tableau suivant :

	POUDRE DE MINE (74 salpêtre ; 15 charbon ; 11 soufre).	POUDRE DE GUERRE ET DE CHASSE FINE (74 salpêtre ; 15 charbon ; 11 soufre).
Trituration (*)	Les ingrédients sont brisés grossièrement et séparément à l'aide d'un marteau; réduits ensuite en morceaux plus petits entre deux laminoirs, ou dans un moulin à noix ; mis enfin en poussière dans des tonnes de trituration. D'un côté, 148k de nitre et 10 de charbon sont pulvérisés ensemble par le choc de 200k de gobilles en bronze, de 12 mill. de diamètre, pendant 5 à 6 heures. De l'autre, 44k de soufre et 40k de charbon sont triturés de la même manière pendant 5 à 6 heures. La vitesse des tonnes de trituration est de 20 à 25 tours par minute. Le travail dépensé par chaque tonne est d'environ 140 kilogrammètres par seconde. Les tonnes sont en tôle de fer et ont 1m,25 de longueur et 1m,10 de diamètre.	La trituration s'opère comme pour la poudre de mine, excepté qu'elle dure 6 heures pour le binaire nitre-charbon, et 12 heures pour le binaire soufre-charbon.

(*) On peut modifier de différentes manières, la trituration et le mélange des matières qui composent la poudre. On peut les pulvériser séparément et les mélanger ensuite ou les pulvériser, combinées de différentes manières. Le mode proposé est à préférer sous le rapport de la sécurité.

La trituration binaire ne présente aucun danger. Il n'en est pas de même de la ternaire, car dans celle-ci les trois composants de la poudre se trouvent réunis. Aussi faut-il chercher à abréger, autant qu'il est possible, la dernière opération, en prolongeant la première. Sous ce rapport, nous ne croyons pas qu'on doive imiter la pratique du Bouchet où, pour la poudre de mine, on triture d'abord en binaire le soufre et le charbon pendant 4 heures; ensuite en ternaire, le salpêtre et ce binaire pendant 4 heures. Nous ne croyons pas non plus bonne à suivre la pratique de Spandau où l'on triture en binaire le salpêtre et le soufre, isolément le charbon, et puis en ternaire, en ajoutant le salpêtre nécessaire en petits cristaux. En effet, tout le monde sait que le charbon, dans un état de grande division, absorbe promptement l'air, se réchauffe et finit quelquefois par s'allumer; tandis que le soufre et le salpêtre, ajoutés au charbon, lui enlèvent la propriété de s'enflammer spontanément.

On peut voir à cet égard une *Note sur l'inflammation spontanée des charbons pulvérisés*, par M. le colonel AUBERT, dans le *Mémorial de l'Artillerie*, N° III.

Quant à la durée de la trituration, il n'y a rien d'absolu. Celle que nous venons d'indiquer correspond à ce que l'on fait dans les autres pays; mais nous pensons qu'on peut la diminuer considérablement, surtout eu égard à la trituration préparatoire qu'on fait subir aux ingrédients.

Mélange	Le mélange s'opère dans une tonne en cuir, à deux compartiments, chacun de $0^m,60$ de longueur sur $1^m,30$ de diamètre. Chaque compartiment contient $39^k,5$ du binaire nitre-charbon et $10^k,5$ du binaire soufre-charbon, 60^k de gobilles en bronze, de 4 à 5 millim. de diamètre. Durée de l'opération: $^3/_4$ d'heure. Vitesse de la tonne: 20 tours par minute. Travail mécanique nécessaire: 120 kilogrammètres par seconde.	Le mélange s'opère comme pour la poudre de mine, excepté qu'il dure 6 heures.
Formation de la galette	On omet cette opération.	Le mélange ternaire, sortant des tonnes, est arrosé avec 4 pour 100 d'eau, bien pétri et mis en galette au moyen d'une presse hydraulique.
Grenage	Le grenage s'opère dans une tonne en bois, du diamètre de $1^m,75$, longue $0^m,63$, ouverte dans le centre d'un de ses fonds par un trou du diamètre de $0^m,55$. On met dans la tonne 100^k de grains fins, qu'on appelle *noyaux*, qui sont arrosés avec 5^k d'eau; on jette dans la tonne 50^k du mélange ternaire, par portions de 1^k environ chacune. Les noyaux humectés, roulant au milieu du poussier sec, grossissent par couches successives et concentriques. Après un nouvel arrosage de 5^k	Le grenage s'opère en brisant la galette au moyen d'un grenoir composé d'une série de cylindres métalliques munis de dents à leur surface. La surface du dernier couple de cylindres est lisse. Les cylindres font 25 révolutions par minute.

Grenage (Suite).	d'eau, on jette 50 autres kilog. de composition. L'opération dure $^1/_2$ heure et produit de 100^k à 120^k de grains de la grosseur convenable. La vitesse de la tonne est de 10 à 12 tours par minute. Le travail mécanique nécessaire, 120 kilogrammètres par seconde.	
Séparation des grains	Les grains sont séparés suivant leur grosseur au moyen de cribles de perces différentes. Le sur-égalisoir de la poudre de mine a des trous de 6 millimètres et le sous-égalisoir des trous de 1,5 millim. Les grains trop petits servent de noyaux pour d'autres fabrications. Les grains trop gros sont brisés et ajoutés aux noyaux.	La poudre, sortant du grenoir, est laissée sécher partiellement, jusqu'à ce qu'elle ne contienne pas plus de 1 pour 100 d'eau, dans une grande salle, sur des toiles imbibées de chlorure de zinc. Puis, on divise les grains en trois espèces au moyen des cribles. Les dimensions des cribles sont les suivantes : mm. Poudre à canon : sur-égalisoir 1 ,2 ; sous-égalisoir 0 ,7 Poudre à fusil : sur-égalisoir 0 ,7 ; sous-égalisoir 0 ,4 Poudre de chasse fine : sur-égalisoir 0 ,4 ; tamis en crin
Lissage	Le lissage a lieu dans une tonne de même forme que celle de granulation. Le chargement est de 250^k de poudre, laquelle est lissée et prend une	Le lissage s'opère, comme pour la poudre de mine ; mais il dure 5 heures.

Lissage (Suite).	densité gravimétrique suffisante (790 à 810) en 2 $^1/_2$ heures. La vitesse et le travail mécanique sont les mêmes que pour la tonne de granulation.	
Séchage	Les grains lissés contiennent de 8 à 10 pour 100 d'humidité, qu'on enlève soit à l'air libre, soit à la sécherie artificielle. Cette opération augmente beaucoup la dureté des grains; mais elle en diminue la densité et la ramène à ce qu'elle était avant le lissage.	La poudre lissée est passée dans un crible à larges mailles, pour en séparer les grumeaux qui peuvent s'être formés. Elle est ensuite séchée au soleil ou artificiellement, jusqu'à ce qu'elle ne diminue plus de poids.
Epoussetage	On l'omet.	La poudre est débarrassée du poussier dans des sacs en toile, contenant chacun 5^k. L'opération dure $^1/_2$ heure pour la poudre à canon, 1 heure pour la poudre à fusil et de chasse.
Egalisage	On l'omet.	Il importe, pour la régularité du tir, que la grosseur des grains soit comprise entre des limites resserrées. C'est pourquoi les poudres de guerre sont égalisées une seconde fois avec les égalisoirs indiqués ci-dessus. De plus, pour rendre uniforme la densité gravimétrique des poudres de guerre, on mélange 12 barils ensemble; et, lorsqu'on a 12 séries de ces premiers mélanges, on les mélange de nouveau entre eux.

Outre la poudre de chasse fine qui se compose des grains les plus fins (au-dessous de 0,4 mill.) de la poudre de guerre, on fabrique des poudres de luxe, dites *superfines* et *extrafines*. Elles s'obtiennent avec les mêmes machines que la poudre de guerre. Le travail subit seulement quelques modifications.

La poudre superfine se fabrique avec les poussiers de la poudre de guerre; de sorte que la trituration binaire est omise, et les poussiers sont triturés pendant 6 heures dans les tonnes ternaires. Le grenoir pour la poudre superfine n'a que les cylindres supérieurs dentés; les autres cylindres sont lisses. Le lissage dure 12 heures.

Pour la poudre extrafine, on fait usage de charbon roux de chènevottes. Les mélanges binaires, dans les mêmes proportions que pour la poudre de guerre, sont triturés pendant un temps double, c'est-à-dire 12 heures le binaire nitre-charbon, et 24 heures le binaire soufre-charbon. La trituration ternaire dure 6 heures. La galette concassée et séchée est remise une seconde fois dans les tonnes ternaires et y subit une nouvelle trituration de 12 heures. Enfin, le lissage dure 24 heures.

III (*).

DE LA CONSTRUCTION ET DE LA DISPOSITION DES BÂTIMENTS COMPOSANT UNE POUDRERIE.

Les bâtiments composant une poudrerie doivent satisfaire à des conditions spéciales, par suite de la possibilité de sauter à laquelle ils sont sujets. Il est bon de s'arrêter d'abord un moment sur les effets produits par l'explosion de la poudre.

Les effets mécaniques de l'explosion d'un bâtiment renfermant de la poudre consistent principalement :

1° Dans la projection des parties dont se compose le bâtiment;

2° Dans la projection de l'air;

3° Dans la commotion et dans les vibrations produites par l'explosion.

Les grandes masses étant lancées plus loin que les petites et produisant de plus grands dégâts, il s'ensuit que, dans la construction des bâtiments, on doit donner la préférence aux petits matériaux. Il faut en bannir le bois, car non-seulement ce matériel est combustible par lui-même quand il est sec, mais encore parce que les

---

(*) On a omis de traduire un article relatif à la convenance que les ouvriers d'une poudrerie soient plutôt bourgeois que militaires, parce qu'aujourd'hui cette discussion serait sans objet.

pores, les fentes et les joints du bois s'imprègnent de poussier de manière à le rendre très-inflammable et très-explosible. Ainsi, chaque bâtiment contenant du bois est non-seulement exposé aux explosions, mais les matériaux d'un bâtiment qui saute étendent le danger d'inflammation à toutes les parties de la poudrerie.

Des trois effets mentionnés ci-dessus, la projection des matériaux est de beaucoup le plus désastreux. Dans l'explosion de la poudrerie de Turin, le 26 avril 1852, ce sont les matériaux lancés qui produisirent les plus grands ravages. Une observation qu'on eut lieu de faire sur la direction des débris lancés mérite la plus grande attention. On remarqua que les matériaux des bâtiments qui avaient sauté furent tous lancés dans une direction normale à la surface dont ils formaient partie. Les quatre faces de chaque bâtiment furent lancées perpendiculairement devant elles, de manière à laisser quatre secteurs intacts. Cet effet, qu'on pouvait prévoir, mais qui n'a jamais été, que nous sachions, signalé, ne doit pas être oublié lors de la construction d'une poudrerie. On peut mettre chaque bâtiment presque en dehors de la sphère d'action des autres, si l'on a soin de le placer dans les *secteurs privés de feux*, ou *angles morts* (comme on dirait en termes de fortification) des autres. Ce qu'on dit des murs latéraux doit s'entendre aussi des toits dont chaque pan est lancé normalement à lui-même et les parties dans lesquelles il se divise décrivent leur trajectoire due à la vitesse initiale reçue et à l'angle de projection, égal au complément de l'inclinaison du toit. En résumé, il faut diriger les parties dont chaque bâtiment se compose vers les endroits pour lesquels il y a moins à craindre.

Le phénomène de l'explosion produit un double mouvement dans l'atmosphère. L'air est d'abord refoulé avec

violence dans tous les sens par les gaz de la poudre; ensuite l'espace raréfié qui se forme est de nouveau envahi par l'air atmosphérique, ce qui détermine un courant dans un sens opposé à l'action directe.

Cet effet de la raréfaction de l'air fut observé dans maintes explosions. Henri Wilkinson (*) raconte qu'à la poudrerie de Waltham-Abbey, la poudre ayant sauté après deux heures de trituration sous les meules, les portes et les fenêtres du moulin en face, de l'autre côté du canal, furent forcés *en dehors*, et les clous arrachés; que, dans l'explosion, en 1833, de la poudrerie de Dartford, une fenêtre, dans la ville de Dartford, éloignée d'un mille et demi de la poudrerie, fut lancée dans la rue.

On observa des effets analogues dans l'explosion de la poudrerie de Turin, en 1852. Pour n'en citer qu'un seul, nous dirons que, dans l'église de saint Pierre ès liens, située à une petite distance de la poudrerie, les pierres sépulcrales se soulevèrent, poussées en dehors par l'air intérieur tendant à se mettre en équilibre avec l'air extérieur raréfié, après le passage de la colonne d'air chassé par l'explosion.

L'action mécanique des gaz de la poudre s'exerce principalement dans la direction des lignes de moindre résistance. Il faut donc tourner les parties faibles des bâtiments vers les endroits les moins fréquentés. S'il existe des objets qu'on veut garantir, il faudra interposer entre eux et le bâtiment dangereux une traverse très-résistante.

L'effet de l'explosion est d'autant moins sensible que la différence de niveau est plus forte. En effet, si le bâtiment qui fait explosion est placé sur une hauteur, les

(*) *Engines of war*. London, 1841, pag. 172.

couches d'air les plus comprimées passeront au-dessus des bâtiments placés plus bas. Si, au contraire, un bâtiment qui saute est placé dans un bas fond, la colonne d'air lancée sera déviée de sa direction primitive et perdra une partie de sa force.

Les ondes sonores que produit l'explosion, se communiquent dans tous les sens avec une intensité à peu près égale; leur effet est bien moindre que celui de l'air lancé par l'explosion.

Enfin, il est clair que l'action des gaz de la poudre pour produire les trois effets mentionnés plus haut est d'autant plus faible que la quantité de poudre renfermée dans chaque bâtiment est plus petite, et que les parois en sont moins résistantes.

De toutes ces considérations on déduit les règles suivantes :

1° On doit diviser et disséminer autant que possible les bâtiments destinés à la fabrication de la poudre;

2° On doit placer chacun de ces bâtiments dans les secteurs privés de feux des autres;

3° On doit leur donner peu de consistance, de manière à ce qu'ils présentent peu de résistance à l'action de la poudre enflammée;

4° On doit les construire à des niveaux différents;

5° On doit mettre à l'abri les habitations et les autres endroits importants au moyen de traverses, ou d'autres obstacles naturels ou artificiels qui les couvrent;

6° On doit construire les bâtiments exposés à sauter, en matériaux petits, et en exclure le bois.

Le toit en sera léger autant que possible. Il paraît que la meilleure toiture serait un comble en fer recouvert de toile rendue incombustible et imperméable.

Il est bon de recouvrir le plancher et les parois des chambres où l'on travaille la poudre, surtout de celles où il se forme beaucoup de poussier, jusqu'à une certaine hauteur, avec des peaux ou des toiles cirées qu'on peut laver facilement, et qui permettent de recueillir les balayures sans mélange de pierres ou autres corps durs (*).

Le terrain de la poudrerie doit être très-peuplé d'arbres, de manière à présenter un obstacle naturel à l'extension des dégâts provenant d'une explosion partielle, tant pour dévier et rompre la colonne d'air, que pour arrêter les débris projetés.

Tous les ateliers à poudre seront renfermés dans une enceinte particulière, dans l'intérieur de laquelle il faudra exercer la plus grande surveillance contre les incendies. Les habitations fournies de cheminées et les ateliers où le feu est indispensable seront éloignés le plus possible de cette enceinte. L'atelier de la carbonisation sera éloigné de l'enceinte, des habitations et des magasins.

Dans la manière de disposer les ateliers, il faut avoir égard non-seulement à la sûreté de la fabrique, mais aussi à l'ordre du travail et à l'économie du temps. Ainsi les ateliers seront disposés dans un ordre tel que les matières composant la poudre entrent d'un côté dans leur état d'éléments et reçoivent successivement, en passant d'un atelier à l'autre, sans jamais revenir en arrière, les diverses opérations qui doivent les convertir en poudre.

Un chemin de fer sera établi le long des ateliers pour les transports de l'un à l'autre.

(*) A l'entrée de chaque atelier à poudre, on placera une grille en bois pour enlever la boue et les pierres de la chaussure avant d'entrer; de plus, sur le seuil, on placera un essuie-pieds, pour se nettoyer mieux la semelle de la chaussure.

IV.

DES BÂTIMENTS ET DE LA PUISSANCE MÉCANIQUE NÉCESSAIRES À L'EXPLOITATION D'UNE POUDRERIE CAPABLE DE FABRIQUER ANNUELLEMENT 600.000^{k} DE POUDRE, DONT 300.000 DE MINE, 200.000 DE GUERRE, 100.000 DE CHASSE.

Avant de terminer cet écrit, nous croyons utile d'énumérer les ateliers et les habitations nécessaires à l'exploitation d'une grande poudrerie et d'indiquer la puissance mécanique qu'exigent les diverses opérations.

Les bâtiments nécessaires à l'exploitation d'une poudrerie sont de quatre espèces, savoir :

1° Ateliers à poudre ;

2° Ateliers où l'on ne travaille point de poudre ;

3° Magasins ;

4° Habitations.

Les ateliers de la première espèce doivent être élevés dans un endroit écarté, enfermés tous dans une seule enceinte, éloignés les uns des autres, séparés, autant que l'on peut, par des accidents de terrain, par des traverses, par des arbres, etc., et être pourvus de paratonnerres. Les ateliers de la seconde espèce, qui peuvent devenir cause d'incendie, doivent être éloignés, autant que possible, des autres, surtout des ateliers à poudre.

On suppose, dans ce qui suit, que la poudre de mine est triturée et mélangée à l'aide des tonnes et grenée par

agglomération dans les tonnes; que la poudre de guerre et de chasse est triturée et mélangée par le moyen des tonnes, mise en galette à l'aide de la presse et grenée au moyen du grenoir anglais. De plus, on suppose que la poudrerie ne comprend ni la raffinerie du salpêtre, ni celle du soufre.

1.

Ateliers à poudre.

Atelier de la trituration préliminaire, séparée des ingrédients. Trois chambres: l'une pour le salpêtre, l'autre pour le soufre, la troisième pour le charbon. Dans chacune: un marteau pour briser grossièrement la matière, et un moulin à noix ou à cylindres pour la réduire en fragments plus petits; le marteau n'est pas nécessaire pour le charbon. A droite et à gauche, un dépôt. Un récepteur hydraulique de la puissance de 4 chevaux.

Département de la poudre de mine.

1° Atelier de la trituration binaire. Trois chambres contenant chacune 2 tonnes en tôle de fer. D'un côté, une chambre pour la pesée des ingrédients; de l'autre un dépôt pour les binaires. Un récepteur de la puissance de 8 chevaux. Deux tonnes sont de rechange.

2° Atelier de la trituration ternaire. Une chambre renfermant deux tonnes en cuir. Une chambre latérale pour la pesée des binaires. Une roue hydraulique de 2 chevaux. Une tonne est de rechange.

3° Atelier du grenage et du lissage. Deux chambres:

dans l'une deux tonnes de granulation, un blutoir pour l'égalisage; dans l'autre deux tonnes de lissage. Une roue hydraulique de 6 chevaux. Une tonne de granulation et une tonne de lissage sont de rechange.

4° Un dépôt pour les poudres vertes.

Total : 3 récepteurs de la puissance de 16 chevaux; 4 bâtiments.

Département des poudres de guerre et de chasse.

1° Atelier de la trituration binaire. Trois chambres renfermant chacune deux tonnes en tôle de fer. Au milieu, une roue de la puissance de 12 chevaux. D'un côté, une chambre pour la pesée des matières premières; de l'autre, un dépôt. Deux des six tonnes sont de rechange et peuvent au besoin servir pour la trituration binaire de la poudre extrafine.

2° Atelier de la trituration ternaire. Trois chambres renfermant chacune deux tonnes en cuir. Une chambre latérale pour la pesée des binaires. Au milieu, une roue de 10 chevaux. Deux des six tonnes sont de rechange et peuvent à l'occasion servir à la trituration ternaire des poudres superfines et extrafines.

3° Atelier de la compression. Trois chambres: la première pour l'arrosage, les deux autres contenant chacune une presse hydraulique. Une roue hydraulique de 2 chevaux. Une presse est de rechange.

4° Atelier de grenage. Deux chambres séparées par une épaisse traverse en terre. Dans l'une, le grenoir ayant à côté une roue de 4 chevaux; dans l'autre, les ouvriers.

5° Salle pour essorer les poudres.

6° Atelier pour la séparation des poudres. Une roue de 2 chevaux.

7° Atelier pour le lissage. Deux chambres avec deux lissoirs dans chacune. Une roue de 4 chevaux au milieu.

8° Magasin de dépôt pour les poudres vertes.

9° Séchoir artificiel. Une roue de 2 chevaux.

10° Atelier pour épousseter les poudres. Une roue de 2 chevaux.

11° Atelier pour égaliser les poudres. Une roue de 2 chevaux.

12° Atelier pour le mélange et l'emballage.

13° Atelier pour empaqueter les poudres fines.

14° Magasin des poudres finies.

Total: 9 récepteurs de la puissance de 42 chevaux; 14 bâtiments.

Total général: 13 récepteurs de la puissance de 62 chevaux; 19 bâtiments.

Une vaste place pour exposer les poudres au soleil.

Une enceinte générale avec deux portes. Chambre du portier. Corps de garde.

2.

Ateliers divers.

1° Atelier de carbonisation du bois. Dépôt pour le charbon. Emplacement pour trier le charbon. Hangar pour fendre le bois. Magasin pour le bois à carboniser. Magasin pour le combustible.

2° Atelier des tonneliers et autres ouvriers en bois. Une roue de 4 chevaux, qui servira aussi pour l'atelier suivant.

3° Atelier des ouvriers en fer.
4° Appareils divers pour l'épreuve des poudres.

3.

Magasins.

Magasin des bois.
— des métaux.
— du soufre.
— du salpêtre.
— des caisses et barils.

4.

Habitations.

Bureau de la direction.
— du magasinier.
Laboratoire de chimie.
Musée.
Habitation du directeur.
— du sous-directeur.
— des officiers appliqués.
— du magasinier.
Ecurie, remise, etc.

V.

DU MOTEUR.

Dans un pays aussi riche en cours d'eau et aussi pauvre en combustible que le nôtre, il n'y a pas à hésiter sur le choix du moteur pour une poudrerie (*). A la considération de l'économie, s'ajoute la circonstance de la nature spéciale de ces manufactures que la prudence conseille de tenir éloignées de tout ce qui peut être cause d'incendie. L'eau est donc le moteur à préférer.

(*) Nous croyons utile de donner l'évaluation approximative de la dépense qu'occasionnerait l'emploi de la vapeur comme moteur dans la poudrerie, le prix de la houille étant supposé de 50 fr. la tonne. C'est le prix actuel (1873) à Gênes.

Doit :

Acquisition d'une machine à vapeur de la force de 66 chevaux-vapeur, système Corliss, à un seul cylindre, à expansion et condensation, consommant 1k,30 de houille par heure et par cheval-vapeur	70 000 fr.
257,4 tonnes de houille à 50 fr., pour 300 jours de 10 heures . .	12 870 »
Huile, graisse, coton, étoupe, etc. 2,75 par jour	825 »
Un mécanicien (5 fr. par jour), un aide (3 fr.), un chauffeur (fr. 2,50), deux manœuvres (4 fr.)	4 350 »
Intérêts à 6 pour 100 sur 70 000 fr.	4 200 »
Frais d'entretien 2 1/2 pour 100	1 750 »
Total de la dépense	93 995 fr.

Avoir :

Valeur de la machine à vapeur	70 000 fr.
66 chevaux-vapeur de force	23 995 »
Total	93 995 fr.

Il résulte de ce compte qu'en employant la vapeur, la force d'un cheval-vapeur revient à 363,56 francs par année de 300 jours de 10 heures.

Comme on l'a vu plus haut, la puissance *utile* nécessaire pour une poudrerie capable de fabriquer annuellement 600.000^{k} de poudre, avec les procédés décrits, est de 66 chevaux. La puissance *disponible* nécessaire doit être plus grande, car un récepteur hydraulique quelconque n'utilise qu'une partie du travail que fournit la chute d'eau.

La fraction utilisée dépend de la nature du récepteur dont le choix est subordonné à une foule de causes de diverses natures. Son prix ; la simplicité plus ou moins grande de sa construction et des ouvrages que nécessitera son établissement ; la facilité des réparations qu'on a besoin de faire de temps en temps ; la nature de la chute, et les variations que sa puissance éprouve aux diverses époques de l'année ; le besoin plus ou moins grand qu'on a d'utiliser le mieux possible la puissance de cette chute, sont autant de motifs qui conduiront à faire adopter tel ou tel système de récepteur.

Lorsqu'on aura fait son choix, on saura quelle fraction de la puissance de la chute sera utilisée par le récepteur qu'on aura adopté. Ce sera, par exemple, les 0,75 de cette puissance, s'il s'agit d'une roue à augets ou d'une turbine ; ou les 0,56 si c'est une roue en dessous à aubes courbes ; ou bien encore les 0,25 si c'est une roue en dessous à aubes planes.

Par conséquent, la puissance disponible nécessaire pourra être de 88 chevaux ou de 264, suivant qu'on adoptera la première ou la dernière de ces roues. Nous pensons donc qu'il est bon que la puissance disponible soit au-dessus de 100 chevaux et non éloignée de 150 chevaux.

Une condition essentielle à laquelle le cours d'eau doit satisfaire, c'est de permettre la division de la chute totale en plusieurs chutes partielles, de manière qu'on puisse éloigner les divers ateliers les uns des autres.

Cette circonstance toute particulière d'une poudrerie a naturellement pour effet une perte de puissance : mais ici la sécurité doit passer avant toute autre considération.

Pour une autre usine, on pourrait sans doute, et avec avantage, établir une seule roue de 66 chevaux, et transmettre le mouvement aux diverses machines spéciales destinées à la production du travail utile ; mais dans une poudrerie il vaut mieux avoir un grand nombre de petites roues, nombre qui, d'après la distribution qu'on a donnée aux ateliers, monte à 14 dans le cas présent.

Vu cette nécessité de petites roues dans une poudrerie, il paraît que les roues à augets, les turbines et les roues à réaction sont préférables; roues qui peuvent rendre toutes des $^3/_4$ aux $^2/_3$ du travail disponible, si elles sont construites et installées convenablement.

Enfin, il est à remarquer que chaque roue doit se mouvoir avec la vitesse qui lui permet d'utiliser la plus grande fraction possible du travail développé par la chute. On devra, en conséquence, établir entre l'arbre de la roue et les mécanismes qu'elle doit faire mouvoir, une liaison telle que ces mécanismes marchent avec la vitesse la plus convenable au travail qu'ils effectuent, lorsque la roue produit le maximum d'effet.

DU NITRATE DE SOUDE

AU LIEU

DU NITRATE DE POTASSE

DANS LA POUDRE

(Rivista Militare, *anno IV, vol. 4. Torino, 1860*).

La poudre, le réservoir de force le plus maniable et le moins pesant que l'on connaisse, est, comme on sait, un mélange de salpêtre, de charbon et de soufre en proportions déterminées : ordinairement six de salpêtre, un de charbon, et un de soufre. Dosage qu'on désignait autrefois par les mots : *six, as et as.*

Le salpêtre (nitrate de potasse, azotate de potasse) se décompose quand la poudre s'enflamme, fournit l'oxygène nécessaire pour brûler le charbon, et laisse développer l'azote qu'il contient. C'est la partie la plus importante de la poudre: il en est, pour ainsi dire, l'âme; mais c'est aussi le plus coûteux des trois composants.

Le nitrate de soude (azotate de soude, nitre cubique, salpêtre du Pérou) est un sel qui a à peu près les mêmes propriétés que le nitrate de potasse et qui peut le remplacer en nombre de cas. Ce sel n'offrait aucun intérêt

industriel, avant qu'on en découvrît au Pérou une couche d'une étendue de plus de 1600 kilomètres carrés, recouverte d'une simple couche d'argile. Aujourd'hui qu'à la suite de cette découverte, le prix du nitrate de soude est tombé au-dessous de la moitié de celui du nitrate de potasse, il est naturel qu'on cherche à substituer le premier au second dans toutes les industries qui emploient le salpêtre.

Jusqu'à présent, on a dit que la nature hygrométrique du nitrate de soude le rendait impropre à la fabrication de la poudre ; et, d'autre part, que la poudre préparée avec ce sel brûle plus lentement que la poudre ordinaire.

Dans le *Traité de l'art de fabriquer la poudre à canon* de Bottée et Riffault (1811), on lit à la page 327 les mots suivants :

« Il a été fait de la poudre avec le nitrate de soude, et « on a reconnu qu'elle s'enflamme difficilement, que sa dé- « tonation est lente, qu'elle produit une flamme d'une « teinte jaune et sans vivacité. »

Dans le *Cours élémentaire de chimie* de Regnault, on lit à la page 159, tome II (1849) :

« On a cherché à employer ce sel (le nitrate de soude) « pour la fabrication de la poudre ; mais il donne une pou- « dre qui attire beaucoup plus facilement l'humidité de « l'air que la poudre ordinaire, et dont l'inflammation est « moins rapide; on y a donc renoncé. »

Ces assertions sur la poudre à base de soude qui se trouvent répétées dans presque tous les traités de chimie, sont-elles tout-à-fait exactes? Nous ne le croyons pas. En ceci, comme en d'autres choses, il faut ne pas s'en rapporter seulement aux paroles d'autrui, mais il est bon de soumettre la question à un nouvel examen.

Les deux défauts que l'on reproche à la poudre à base de soude sont: 1° d'être hygrométrique; 2° de manquer de force.

D'abord, quant à la nature hygrométrique du nitrate de soude, nous ferons observer que le nitrate de soude du commerce doit cette qualité aux chlorures qu'il contient. Si ces derniers en sont séparés, on obtient un sel qui reste sec, même quand on l'expose dans un lieu humide, et qui n'offre aucune trace de déliquescence.

Assurément le nitrate de soude est plus soluble dans l'eau que le nitrate de potasse; mais s'il est séparé avec soin de tout corps qui attire l'eau de l'atmosphère, il se conserve sec.

L'inaltérabilité du nitrate de soude peut être augmentée en le soumettant à la fusion. Nous conservons chez nous, depuis plusieurs années, parfaitement en bon état, du nitrate de soude raffiné et fondu.

Le nitrate de potasse que l'on destine à la fabrication de la poudre, est séparé avec soin de toutes les matières étrangères, surtout des chlorures qui attirent l'humidité atmosphérique. Qu'on en fasse autant pour le nitrate de soude, et l'on verra que ce sel n'est point hygrométrique.

Néanmoins la poudre à base de soude sera toujours quelque peu plus hygrométrique que la poudre à base de potasse, et cela à cause de la plus grande solubilité du nitrate de soude dans l'eau, eau qui est fournie par le charbon qui la tire de l'air ambiant. Mais pour des poudres qu'on n'a pas besoin de garder longtemps, et qui ne sont pas exposées à l'humidité, comme, par exemple, pour la poudre de mine, nous croyons que le nitrate de soude peut être un utile succédané du salpêtre.

Quant au second défaut qu'on reproche au nitrate de

soude, savoir de donner une poudre faible, nous ferons observer que, eu égard seulement au volume des fluides élastiques dégagés dans la combustion, à poids égal, la poudre au nitrate de soude, l'emporte sur l'autre au nitrate de potasse, car l'équivalent chimique du sodium est plus faible que celui du potassium.

En calculant le volume des gaz dégagés par les deux poudres, on trouve que la première produit un volume de gaz supérieur de plus de $^1|_8$ à celui que donne la seconde.

Nous allons ajouter la démonstration de cette assertion, que le lecteur étranger aux sciences chimiques pourra passer sans inconvénient.

Un mélange d'un équivalent de nitrate de soude, trois équivalents de carbone et un équivalent de soufre produit, en faisant explosion, trois équivalents d'acide carbonique, un équivalent d'azote et un équivalent de sulfure de sodium; laquelle réaction est représentée par la formule chimique

$$NaO.NO^5 + C^3 + S = 3CO^2 + N + NaS.$$

L'équivalent de l'acide carbonique étant représenté par deux volumes, comme aussi celui de l'azote, il s'ensuit qu'il se développe en tout huit volumes de gaz.

En prenant l'équivalent de l'hydrogène égal à l'unité, nous avons

$$C = 6, \qquad S = 16,$$

$$O = 8, \qquad Na = 24,$$

$$N = 14, \qquad K = 40.$$

Donc la composition de la poudre à base de soude, sera:

1 équivalent de nitrate de soude	$NaO.NO^5 = 86$
3 équivalents de carbone	$C^3 = 18$
1 équivalent de soufre	$S = 16$
	120

Ce qui donnera, pour 100 parties de poudre,

Nitrate de soude	71,7
Carbone	15,0
Soufre	13,3
	100,0

D'autre part, un mélange de

1 équivalent de nitrate de potasse	102	75,0
3 équivalents de carbone . . .	18	13,2
1 équivalent de soufre	16	11,8
	136	100,0

produit, en brûlant, la réaction indiquée par la formule

$$KO.NO^5 + C^3 + S = 3\,CO^2 + N + KS,$$

soit huit volumes de gaz également.

Mais l'équivalent de la première poudre pèse 120, et celui de la seconde 136; donc, à poids égal, les deux poudres produisent des volumes de gaz dans le rapport de 136 à 120, ou de 17 à 15.

Un gramme de poudre ordinaire produit, en brûlant, 326 centimètres cubes de gaz permanents, réduits à la température de 0°, et à la pression barométrique de $0^m,76$. Donc un gramme de poudre, préparée avec le nitrate de soude, produira 369 centimètres cubes de gaz.

Malgré tout cela, il pourrait arriver que la poudre à base de soude eût moins de force que la poudre à base de potasse, si la chaleur dégagée par la combustion était moins considérable. L'expérience seule peut prononcer à ce sujet.

Maintenant, beaucoup d'expériences en différentes circonstances nous ont démontré d'une manière incontestable, que la poudre fabriquée avec le nitrate de soude surpasse en force la poudre de mine ordinaire; mais qu'elle est inférieure à la poudre de guerre et de chasse.

C'est pourquoi nous croyons qu'on peut obtenir avec le nitrate de soude une poudre de mine suffisante pour les usages auxquels on la destine.

L'économie résultant de la substitution du nitrate de soude au salpêtre ne serait pas de peu d'importance. En effet 100 kilog. de la poudre actuelle de mine contiennent 62 kil. de nitrate de potasse (*), qui, au prix de 100 francs par quintal, coûtent 62 fr. La nouvelle poudre de mine, selon la théorie chimique devrait être composée de

70	nitrate de soude
17	charbon (**)
13	soufre
100	

(*) La poudre de mine actuelle (1860) est composée de

62	salpêtre
19	charbon
19	soufre
100	

(**) Le charbon n'est pas du carbone pur: il contient une certaine quantité d'oxygène et d'hydrogène qui n'ont pas été chassés par la carbonisation. En outre, il contient toujours de l'eau hygrométrique et un peu de cendre. C'est pourquoi la proportion du charbon dans la poudre doit être plus forte que celle du carbone que j'ai donnée plus haut. La proportion ci-indiquée suppose un charbon contenant le 2 pour 100 d'eau hygrométrique, et dont chaque gramme, l'eau étant expulsée, exige 2,35 grammes d'oxygène pour brûler complétement, de manière à convertir tout le carbone en acide carbonique, et tout l'hydrogène en eau. Ces chiffres sont la moyenne de nombreuses expériences faites sur des charbons obtenus dans des fours.

En mettant le prix du nitrate de soude à 40 fr. le quintal, prix certainement supérieur au prix réel, on aura 28 fr. pour le coût du nitrate de soude nécessaire pour un quintal de poudre. La différence entre le coût du nitrate de potasse et celui du nitrate de soude, par quintal de poudre, est donc de 34 fr.

Or, dans les anciennes provinces de l'État, la consommation annuelle de la poudre de mine était de trois mille quintaux environ, de manière qu'on peut calculer pour le nouvel État une consommation non inférieure à six mille quintaux, qui, multipliés par 34, donnent une économie de 204 mille francs par an, représentant un capital de plus de 4 millions.

Pour procéder en toute rigueur, il faudrait à cette économie provenant de la substitution de 70 kil. de nitrate de soude à 62 kil. de nitrate de potasse, ajouter celle qui résulte de la diminution de 2 kil. de charbon et de 6 de soufre par quintal de poudre; mais cette dernière économie s'élève à si peu de chose que ce n'est pas la peine d'en parler. La substitution du nitrate de soude au nitrate de potasse produit à elle seule une économie suffisante pour conseiller des essais à ce sujet.

On pourrait aussi essayer des poudres composées en partie de nitrate de potasse et en partie de nitrate de soude, à la condition cependant que la proportion des nitrates soit telle que tout le charbon reste acidifié; car il est prouvé par l'expérience que la poudre de mine la plus économique est celle qui remplit cette condition.

Depuis quelques années, en Belgique et ailleurs, on a cherché à substituer à la poudre de mine une composition de nitrate de soude, de soufre et de sciure de bois, ou même de l'écorce pulvérisée qui a servi au tannage des

peaux. Cette composition aurait, au dire des fabricants, l'avantage de n'offrir aucun danger dans sa préparation et sa conservation; car si l'on ne met aucun obstacle à l'expansion des gaz qui se sont formés par la combustion, ou, en d'autres termes, si la combustion a lieu en plein air, la composition ne ferait pas explosion et brûlerait très-lentement.

Nous avons quelques doutes au sujet de l'efficacité de ce composé. Certainement, à poids égal, le prix en sera inférieur à celui de la poudre de mine actuelle; mais il est très-probable que, à puissance égale, il coûtera plus que la poudre.

La substitution du bois au charbon a pour effet d'introduire dans le mélange explosif des matières étrangères qui ne concourent pas à la formation des fluides élastiques, et dont l'effet se réduit à diminuer la rapidité de la combustion.

Le prix du charbon n'est pas tellement élevé qu'on doive penser à l'économiser au préjudice de la force.

D'autre part, il ne faut pas trop se fier à l'innocuité de ce composé, car quoique il ne fasse pas explosion en petite quantité et à l'air libre, cependant il pourrait très-bien s'enflammer en grande masse, comme il arrive avec la poudre ordinaire, qui, lorsqu'elle est humide, et non encore achevée, lorsqu'elle est *verte*, comme on dit dans les poudreries, ne s'enflamme pas en petite quantité, mais fait explosion en grandes masses, comme on en a fait la triste expérience dans l'explosion de la poudrerie de Turin, en 1852.

Sous le rapport de l'économie, jusqu'à ce que des expériences concluantes ne soient venues prouver le contraire, nous préférerons toujours le charbon à la sciure de bois, ou à la poudre qui a servi au tannage des cuirs.

Nous devons ajouter ici une observation, savoir que le procédé de fabrication de la poudre au moyen des pilons, convient mal au nitrate de soude, car cette méthode exige l'emploi d'une trop grande quantité d'eau. Nous croyons que c'est à l'emploi de ce procédé qu'il faut attribuer l'insuccès des essais qu'on a faits autrefois à ce sujet.

De nos jours, où grâce à l'introduction de procédés plus perfectionnés et plus rationnels, non-seulement on peut fabriquer la poudre avec de petites quantités d'eau, mais que même on peut se passer de ce liquide qui est considéré comme le plus grand ennemi que la poudre puisse avoir, il ne sera pas difficile de tirer parti du nitrate de soude.

Les poudres de guerre et de chasse qui doivent satisfaire à la condition de se conserver longtemps, qui sont sujettes à beaucoup de vicissitudes, ne pourront probablement pas profiter de la substitution dont il s'agit, sinon peut-être indirectement à cause du prix inférieur, auquel tombera naturellement le nitrate de potasse, quand on ne l'emploiera plus pour la poudre de mine; mais pour cette dernière, nous sommes d'avis qu'on pourra adopter le nitrate de soude seul, ou même associé au nitrate de potasse, au grand avantage du public.

La conclusion de tout ce que nous avons dit jusqu'ici, c'est qu'il y a lieu de reviser l'opinion qui a prévalu sur l'impossibilité de substituer le nitrate de soude à celui de potasse dans la composition de la poudre, tout au moins pour ce qui regarde la poudre de mine, parce que cette opinion est appuyée sur des expériences faites avec du nitrate de soude non raffiné, et avec des procédés de fabrication peu compatibles avec la grande solubilité de

ce sel ; c'est que, par conséquent, il faut revenir sur une question qui intéresse les finances (*) et l'industrie.

Nous ajouterons à l'appui de ces idées mises en avant en 1860 que la poudre au nitrate de soude a été employée en grand dans les travaux de l'isthme de Suez. (*Addition de 1873*).

(*) Cet article a été écrit à l'époque où le gouvernement gardait le monopole des poudres. Aujourd'hui, dans les établissements de l'État, on ne fabrique plus que les poudres de guerre. (*Addition de 1873*).

SUR

L'ANALYSE DU CHARBON

DESTINÉ À LA FABRICATION DE LA POUDRE.

(*Journal des Armes spéciales et de l'État-Major*,
4e série, t. XIV. Paris, 1860).

Des trois composants de la poudre, deux, le salpêtre et le soufre, sont employés toujours au même état de pureté presque absolue, de sorte qu'il ne peut exister d'incertitude sur leur proportion relative. Il n'en est pas de même du troisième ingrédient, le charbon. En effet, celui-ci est un composé de carbone, d'hydrogène, d'oxigène, d'azote et de cendres, variable selon le mode de carbonisation et l'espèce du bois. Suivant que la chaleur, dans l'opération de la carbonisation, a été plus ou moins forte; suivant que l'action en a été prolongée plus ou moins longtemps, le charbon obtenu présente une composition différente. En variant la température et la durée de l'opération, on peut, de 100 parties de bois, retirer 40, 35, 30, 25, 20, 15 parties de charbon. Ces charbons à titres divers n'ont point la même composition élémentaire, et ne peuvent, par conséquent, entrer en même proportion dans la poudre.

Le dosage de la poudre devant être déterminé d'après la nature du charbon, il serait à désirer qu'on possédât un procédé d'analyse des charbons simple et facile; car l'analyse élémentaire qu'emploie la chimie pour les matières organiques, est trop longue et d'une exécution trop difficile, pour qu'on puisse penser à en faire usage dans les poudreries, où l'on manque des appareils nécessaires et des personnes exercées aux manipulations chimiques. Nous allons suggérer un procédé qui nous a réussi assez bien.

Nous devons, avant tout, faire remarquer que, pour déterminer le dosage de la poudre, il n'est pas besoin de connaître la composition élémentaire du charbon, mais qu'il suffit de connaître la quantité d'oxigène nécessaire pour brûler le charbon, de manière à convertir en acide carbonique et en eau le carbone et l'hydrogène qu'il contient; car cette quantité d'oxigène étant donnée, on en déduira le nitrate de potasse qui peut la fournir; et d'après le potassium contenu dans ce nitrate, on trouvera le soufre nécessaire pour le transformer en monosulfure (*).

Si a est le poids en grammes de l'oxigène nécessaire pour brûler un gramme du charbon donné, le poids x du nitrate de potasse qui peut fournir cet oxigène, se déduira de la proportion

$$(KO \,.\, NO^5) : O^5 :: x : a.$$

Le poids du soufre y sera donné par la proportion

$$(KO \,.\, NO^5) : S :: x : y.$$

(*) Voyez la note à la fin de cet article.

En posant l'équivalent de l'hydrogène égal à l'unité, on a

Oxygène	$O = 8$,
Azote	$N = 14$,
Soufre	$S = 16$,
Potassium	$K = 40$,
Nitrate de potasse . .	$KO \,.\, NO^5 = 102.$

Cela posé, les deux proportions ci-dessus deviennent

$$102 : 48 :: x : a,$$

$$102 : 16 :: x : y,$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{102}{48} a = \frac{17}{8} a,$$

$$y = \frac{16}{48} a = \frac{1}{3} a,$$

pour les quantités de nitrate de potasse et de soufre qui doivent être réunies à l'unité de charbon.

Donc le dosage de la poudre, pour un charbon dont un gramme exige a grammes d'oxigène pour brûler complétement, sera

Salpêtre	$\frac{17}{8} a$	ou bien	51
Charbon	1		$\frac{24}{a}$
Soufre	$\frac{1}{3} a$		8.

On voit par là que la seule donnée nécessaire pour déterminer le dosage de la poudre, c'est la quantité a, qui représente le poids en grammes de l'oxygène qu'absorbe un gramme de charbon en brûlant.

Pour déterminer la quantité a, nous avons imaginé de nous servir du procédé que M. Berthier a proposé pour déterminer la puissance calorifique des combustibles. Tout le monde sait que ce procédé consiste à mélanger le combustible à essayer avec 60 fois environ son poids de litharge (protoxyde de plomb, $Pb\,O$), et à l'exposer au feu dans un creuset.

Ce qui se passe dans cette opération est facile à comprendre: l'oxygène d'une partie de la litharge se combine avec le carbone du charbon pour former de l'acide carbonique qui se dégage, et avec l'hydrogène en formant de l'eau, qui se dégage pareillement; le plomb rendu libre se sépare. D'après le poids p de ce plomb réduit, on conclut la quantité a de l'oxygène que le charbon a absorbé en brûlant.

Comme dans la litharge $Pb = 104$ correspond à $O = 8$, p grammes de plomb réduit correspondront à a grammes d'oxygène absorbé: on a donc

$$104 : 8 :: p : a\,,$$

d'où

$$a = \frac{8}{104}\,p = \frac{1}{13}\,p.$$

Voici maintenant la manière d'opérer. On commence par chasser l'eau du charbon à analyser en le chauffant pendant quelque temps à une température très-peu supérieure à celle

de l'eau bouillante. Cela fait, on réduit le charbon en particules aussi fines que possible en le porphyrisant. On prendra un poids donné de cette poudre de charbon qu'on mêlera avec 30 fois environ son poids de litharge en poudre. On introduira le mélange avec soin au fond d'un creuset de terre; on mettra par-dessus une autre quantité égale de litharge en poudre; le creuset doit être à moitié rempli, tout au plus. On placera ce creuset sur un *fromage*, petite masse cylindrique d'argile cuite qu'on vend avec le creuset et qui sert à l'élever au-dessus du fond du fourneau. On introduira le tout dans un fourneau déjà chauffé et rempli de charbon bien allumé. On mettra le couvercle sur le creuset et l'on chauffera graduellement. Il y aura ramollissement, bouillonnement et souvent boursouflement. Lorsque la fusion sera complète, on couvrira le creuset de charbon et l'on donnera un coup de feu pendant environ dix minutes, pour que le plomb de la litharge, qui a été rendu libre, puisse se rassembler en une seule masse. On retirera le creuset du feu, on le laissera refroidir à l'air, on le cassera et l'on retirera le culot de plomb que l'on pèsera. Ce culot n'adhère ni au creuset ni à la scorie, et il suffit d'un coup de marteau pour l'enlever. Quelquefois il est livide, feuilleté et peu ductile; c'est qu'alors il est pénétré d'une petite quantité de litharge qui en augmente sensiblement le poids. Ces signes indiquent que l'expérience a été faite trop rapidement; il faut la reprendre. En général, il convient de répéter au moins deux fois l'expérience, et l'on ne doit compter sur les résultats que quand ils ne diffèrent que de 1 à 2 dixièmes de gramme.

Pour ce qui regarde la litharge, on doit remarquer qu'on trouve dans le commerce deux espèces de litharge, la rouge et la jaune. C'est la première qu'on devra préférer

pour les essais; toutefois, on devra, avant de l'employer, la fondre le plus rapidement possible dans un creuset de terre et la faire refroidir promptement hors du contact de l'air, soit dans le creuset en tenant celui-ci bien couvert, soit en la coulant dans une lingotière froide. Si l'opération a été bien faite, il ne se sera produit à la surface que très-peu d'oxyde rouge, dont il conviendra de se débarrasser; le reste sera de la litharge jaune, mais qui ne sera pas souillée par les impuretés que présentent les litharges jaunes du commerce. On la pilera alors, et on la passera à travers un tamis fin. Dans cet état, sa composition chimique sera à très-peu de chose près celle du protoxyde de plomb pur.

Voici maintenant les résultats obtenus par ce procédé mis en regard de ceux que donne la méthode ordinaire d'analyse des substances organiques de Liebig.

Les charbons analysés provenaient de quatre espèces de bois:

Chènevotte (*Cannabis sativa*, L.);
Osier blanc (*Salix viminalis*, L.);
Saule blanc (*Salix alba*, L.);
Coudrier (*Corylus Avellana*, L.).

La carbonisation de ces bois a été effectuée par deux procédés différents: par la *distillation en cylindres*, et par la *carbonisation en fours*. La distillation a été poussée à deux degrés divers, de manière à donner deux produits, l'un de 30 et l'autre de 25 pour 100.

Oxygène absorbé par un gramme de charbon en brûlant.

NATURE du bois	MODE de carbonisation	QUANTITÉ de CHARBON obtenue de 100 parties de bois	OXYGÈNE		$\frac{24}{a}$
			Méthode proposée a	Analyse élément. (1)	
			grammes	grammes	
Chênevotte . .	Distillation en cylindres	30	2,25	2,17	10,7
Osier blanc . .			2,28	2,29	10,5
Saule blanc . .			2,08	2,14	11,1
Coudrier . . .			2,26	2,04	10,6
Chênevotte . .	Distillation en cylindres	25	2,39	2,38	10,0
Osier blanc . .			2,31	2,30	10,4
Saule blanc . .			2,32	2,24	10,3
Coudrier . . .			2,33	2,35	10,3
Osier blanc . .	Carbonisation en fours	22	2,31	2,38	10,4
Saule blanc . .		24	2,32	2,32	10,3
Coudrier . . .		23	2,27	2,50	10,6

Les chiffres contenus dans la colonne (1) sont déduits du tableau suivant:

Composition élémentaire des charbons (méthode de Liebig).

NATURE du bois	MODE de carbonisation	RENDEM. pour 100 en charbon	100 PARTIES DE CHARBON CONTIENNENT :			
			Carbone	Hydrog.	Oxygène et azote	Cendres
Chênevotte	Distillation en cylindres	30	73,7	4,9	19,4	2,0
Osier blanc			79,2	4,0	14,5	2,3
Saule blanc			75,4	3,9	18,6	2,1
Coudrier. .			72,0	4,1	20,8	3,1
Chênevotte	Distillation en cylindres	25	85,6	2,5	10,5	1,4
Osier blanc			81,0	3,4	13,3	2,3
Saule blanc			77,9	3,9	15,9	2,3
Coudrier. .			79,4	4,5	13,0	3,1
Osier blanc	Carbonisation en fours	22	83,4	3,4	11,1	2,1
Saule blanc		24	79,2	4,4	14,6	1,8
Coudrier .		23	83,9	4,3	8,2	3,6

Dans deux analyses faites pour déterminer l'azote séparément de l'oxigène, on a trouvé que 100 de charbon contiennent 0,2 environ d'azote.

Pour déduire du second tableau la colonne (1) du premier, il n'y a qu'à multiplier par $\frac{8}{3}$ la quantité du carbone, et par 8 la quantité de l'hydrogène, à ajouter les deux produits, et à soustraire de la somme la quantité d'oxygène, diminuée de 0,2. C'est une conséquence des deux formules chimiques suivantes:

$$\text{Acide carbonique} \ldots \quad CO^2 = 22,$$

$$\text{Eau} \ldots \quad HO = 9,$$

où

$$H = 1, \qquad C = 6, \qquad O = 8.$$

En comparant les résultats obtenus par les deux méthodes, on voit qu'ils sont assez d'accord; ce qui prouve qu'on peut employer en sûreté la méthode proposée.

Le quotient du nombre 24 divisé par les valeurs de a, trouvées à l'aide du procédé proposé, donne le poids de chaque charbon à associer à 51 de nitre et à 8 de soufre. La dernière colonne du premier tableau donne ce quotient.

Il importe d'observer que le poids du charbon doit être augmenté du poids de l'eau hygrométrique que celui-ci absorbe, dans l'intervalle qui sépare le moment où il sort de l'appareil de carbonisation du moment où il est pesé pour entrer dans la composition. Cette quantité est variable selon l'état hygrométrique de l'atmosphère, et le temps plus ou moins long pendant lequel il reste exposé à l'air.

Dans une expérience faite à cet égard, le charbon de

saule, préparé en fours, abandonné à l'air dans un magasin, a absorbé après

2	jours	1	pour 100 d'eau
4	»	1,60	—
12	»	2,95	—
24	»	3,27	—
29	»	3,37	—
44	»	3,54	—
53	»	3,62	—

Une autre expérience a donné les résultats suivants:

Après 21 jours 4 pour 100

» 28 » 5 —

En toute rigueur, avant de mélanger les trois ingrédients de la poudre, on devrait chaque fois faire une analyse du charbon, pour en déduire le poids de celui-ci qu'on doit associer aux deux autres éléments; mais cela est tout à fait impraticable en grand. D'ailleurs cela n'aurait pas une grande utilité, car tout artilleur sait que le dosage de la poudre, entre certaines limites, n'a qu'une influence secondaire sur ses effets, qui dépendent bien plutôt de ses qualités physiques. En pratique, on peut se contenter d'une valeur moyenne déduite de bonnes analyses préalables.

D'après les analyses ci-dessus mentionnées, la moyenne des proportions relatives aux charbons distillés à 25 p. 100 est 10,25. Si l'on ajoute à ce chiffre le 2 p. 100 pour l'humidité, on a 10,45 qu'on pourrait prendre pour la dose du charbon noir à 25 p. 100.

Par conséquent, le dosage à adopter pour le charbon noir distillé au titre de 25 p. 100, serait:

Salpêtre	51	73,4
Charbon	10,45	15,1
Soufre	8	11,5
	69,45	100,0

NOTE

SUR LES PRODUITS DE LA COMBUSTION DE LA POUDRE.

MM. Bunsen et Schischkoff ont publié dans les *Annales de Poggendorf* un travail très-remarquable sur la combustion de la poudre (*). Ces habiles chimistes ont trouvé que le résidu de la combustion de la poudre est composé principalement de sulfate et de carbonate de potasse et qu'il contient fort peu de sulfure de potassium, contrairement à ce qu'indiquent la plupart des traités d'artillerie et de chimie.

Si cela arrivait constamment dans la combustion de toute sorte de poudre, comme les auteurs paraissent l'admettre, le dosage de la poudre devrait être modifié, pour employer utilement tous les éléments de la poudre. Le dosage dépendrait alors du rapport entre le sulfate et le carbonate de potasse.

(*) Ce Mémoire a été traduit par M. A. Terquem et publié par M. J. Corréard sous le titre: *Théorie chimique de la combustion de la poudre*, par R. Bunsen et L. Schischkoff. Paris, 1859.

Mais, à cet égard, on nous permettra une observation. Le dosage de la poudre employée par MM. Bunsen et Schischkoff est tel, que le résidu ne pouvait être différent de celui qu'ils ont trouvé, de sorte que leur analyse ne prouve nullement que la combustion de la poudre se fasse d'une autre façon qu'on l'a supposé jusqu'ici. En effet, d'après les auteurs, la composition de la poudre qu'ils ont employée était la suivante:

Nitrate de potasse		78,99
Charbon	Carbone	7,69
	Hydrogène . .	0,41
	Oxygène. . . .	3,07
Soufre		9,84
		100,00

Voyons ce qui doit arriver dans la décomposition d'une pareille poudre. Les 0,41 hydrogène prendront, pour se convertir en eau, 3,28 oxygène; c'est-à-dire 0,21 oxygène en sus de l'oxygène contenu dans le charbon. Les 7,69 parties de carbone absorberont 20,51 oxygène pour former 28,20 acide carbonique. L'acide nitrique des 78,99 parties du nitrate de potasse fournit 30,98 parties d'oxygène; en déduisant de ce chiffre l'oxygène employé pour brûler l'hydrogène et le carbone, il reste 10,26 parties d'oxygène qui doivent naturellement se porter sur le soufre pour l'acidifier. Ces 10,26 parties s'uniront à 6,84 soufre en formant 17,10 acide sulfurique, qui se combinera avec 20,52 potasse en donnant naissance à 37,62 sulfate de potasse. Il reste 3 de soufre qui, en s'unissant avec 9 de potasse du nitre, formera 4,12 sulfate de potasse et 7,88 sulfure de potassium. Les 78,99 parties du nitre contenant 37,17 parties de

potasse, il en reste 7,65 non employées qui s'uniront à 3,51 acide carbonique pour former 11,16 carbonate de potasse; de sorte que de 28,20 acide carbonique, il ne s'en dégagera que 24,69.

En résumé, un gramme de poudre composé comme il suit:

Salpêtre		0gr,7899	
Soufre		0 ,0984	
Charbon	C.	0 ,0769	
	H.	0 ,0041	
	O.	0 ,0307	
		1 ,0000	

donnera en brûlant

Résidu solide 0gr,6078	Sulfate de potasse. . .	0gr,4174	
	Carbonate de potasse.	0 ,1116	
	Sulfure de potassium	0 ,0788	
Gaz 0gr,3553	Azote.	0 ,1084 =	86,3 cent. cub.
	Acide carbonique . . .	0 ,2469 =	124,8
			211,1
Eau 0gr,0369		0,0369	
1gr,0000		1,0000	

Ces résultats ne sont guère éloignés de ceux qu'ont trouvés MM. Bunsen et Schischkoff à l'aide de l'analyse chimique des produits de la combustion (*). La présence, en quantité du reste assez petite, des autres produits qu'ils ont trouvés,

(*) Voyez page 43 de l'édition française de leur mémoire.

tels que hyposulfite de potasse, sulfocyanure de potassium, azotate de potasse, charbon, soufre, carbonate d'ammoniaque, qui tous ensemble s'élèvent à $0^{gr},1102$; ainsi que des produits gazeux: oxyde de carbone, hydrogène, acide sulfhydrique, oxygène, s'élevant ensemble à $0^{gr},0128$, s'explique assez facilement si l'on veut bien remarquer que la détonation de la poudre ayant eu lieu sous la pression barométrique ordinaire, une partie des ingrédients a pu échapper à la réaction. Si la même poudre avait été brûlée dans une arme à feu, nous sommes convaincu que les produits secondaires ci-dessus mentionnés ne se seraient pas formés, que la décomposition aurait été plus complète, et qu'on aurait trouvé seulement les produits que nous avons indiqués.

On voit par là que les théories reçues ne sont point en défaut, et que les produits que MM. Bunsen et Schischkoff ont trouvés sont précisément ceux qu'on devait attendre de l'explosion d'une poudre contenant un excès d'oxygène. Si au lieu de prendre une poudre d'une composition presque exceptionnelle, ces habiles chimistes avaient opéré sur une poudre dosée comme le sont d'ordinaire les poudres de guerre, ils auraient probablement trouvé le résidu de la combustion formé de sulfure de potassium, et non de sulfate et de carbonate de potasse.

RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES

FAITES À DIVERSES HAUTEURS

TOUCHANT

LA DURÉE DE COMBUSTION DE LA MATIÈRE DE LA POUDRE.

(*Atti dell'Accademia delle Scienze di Torino*, vol. I, p. 405. Torino, 1866).

Depuis longtemps on s'était aperçu que la poudre brûle d'autant plus difficilement que le milieu ambiant est plus raréfié. Ce fait n'avait pas échappé au comte Joseph-Ange Saluces, l'un des fondateurs de cette Académie, ni à Papacino d'Antoni, l'un de ses premiers membres. Dans un Mémoire fort remarquable du premier, inséré dans les volumes I et II des *Miscellanea Taurinensia*, on lit ces mots (*): « Tous les physiciens ont observé que la poudre « ne brûle que très-lentement, très-difficilement, et en très- « petite quantité, dans le vide; mais quelques-uns se sont « contentés de rapporter simplement le fait. D'autres ont « confondu ce phénomène avec ce qui arrive à toutes les « espèces de flammes, et ont assigné cet effet à quelque

(*) Vol. II, pag. 95.

« propriété particulière de l'air. Un fait que j'ai rapporté « dans mon second *Mémoire*, pag. 146. § 42 que la poudre « s'enflamme dans quelque air infecté que ce soit), et un « examen réfléchi sur d'autres expériences faites par plu- « sieurs auteurs, m'ont donné lieu de penser que ce n'était « que dans la pression qu'exerce l'air sur la flamme qu'on « en devait chercher la raison. En effet, j'ai fait voir que la « poudre s'enflamme dans quelque air infecté que ce soit, « et Boyle nous apprend qu'une fusée continue à brûler « sous l'eau. La flamme de la poudre n'a donc besoin que « d'une pression qui en augmente l'intensité en la rete- « nant autour des grains. » Plus loin on lit : « L'air ne « fait point d'autre fonction que de comprimer la poudre, « et, en s'opposant à la libre expansion de la flamme et « du fluide, il procure une intensité suffisante au feu des « premiers grains pour enflammer les autres, et à mesure « que la pression est plus grande, la propagation du feu « est aussi plus prompte. »

On voit par ces citations que déjà, depuis plus d'un siècle, on savait que la combustion de la poudre n'est pas influencée par la nature du milieu, mais seulement par sa pression.

Ces vérités étaient enseignées dans les écoles de l'artillerie piémontaise par D'Antoni, et nous les trouvons énoncées dans deux de ses ouvrages qui ont fait époque : l'*Esame della polvere* et l'*Uso delle armi da fuoco*. Dans le second de ces traités le phénomène de la plus grande difficulté de combustion de la poudre dans l'air raréfié est mentionné à l'occasion d'un fait qu'on crut observer dans nos guerres sur les Alpes en 1743, 1744 et 1747. On remarqua alors de grandes différences entre les portées des fusils au fond des vallées et sur le sommet des

montagnes, les portées étant plus grandes dans les endroits élevés. Suivant D'Antoni, la vitesse initiale de la balle est moindre sur les sommets que dans les vallées, parce que l'air y est plus raréfié. Mais, malgré cela, comme la résistance de l'air y est plus petite, par suite de la moindre densité de ce fluide, il en résulte que les portées y sont plus grandes que dans le bas.

Quelle que soit la justesse du fait des plus grandes portées sur les hauteurs, fait dont on ne s'est plus occupé depuis, que je sache, toujours est-il vrai de dire qu'on se rendait dès lors parfaitement compte du mode d'action de la poudre.

Après avoir constaté le fait de l'influence de la pression sur la combustion de la poudre, il ne restait qu'à le mesurer, en cherchant la relation qui existe entre la vitesse de combustion de la matière de la poudre et la pression du milieu ambiant. Cependant cette recherche ne fut entreprise que beaucoup plus tard, et même pendant longtemps encore on méconnut la réalité du fait.

Nous voyons en effet M. le général Piobert établir, comme un principe, que la vitesse de combustion de la poudre est indépendante de la pression (*). Néanmoins l'influence de la pression sur la vitesse de combustion de la poudre est maintenant mise hors de doute, et il me semble qu'une théorie du mouvement des gaz de la poudre, dans les armes à feu, qui n'en tient point compte, doit laisser beaucoup à désirer.

Si réellement l'influence de la tension des gaz et de la température était insensible sur la durée de la combustion,

---

(*) *Traité d'Artillerie théorique et pratique. Partie théorique et expérimentale. — Propriétés et effets de la poudre* — 1847, pag. 138 et 376.

comme l'admet M. le général Piobert, la vitesse de combustion de la matière de la poudre étant d'environ $12^{mm},5$ par seconde, à la pression ordinaire, il s'ensuivrait que, pendant le temps qu'une balle de fusil reste dans l'âme, temps qui n'arrive pas à $\frac{1}{250}$ de seconde, chaque grain de poudre ne brûlerait que sur l'épaisseur de $\frac{1}{20}$ de millimètre; de sorte que, pour un grain d'un millimètre de diamètre, le rapport de la poudre brûlée à la quantité totale serait à peine un peu plus de $^1/_4$; par conséquent, près des $^3/_4$ de la charge ne contribueraient en rien à chasser le projectile.

Le temps que le boulet emploie à parcourir l'âme d'un canon est un peu plus grand: en admettant qu'il soit de $\frac{1}{200}$ de seconde, et que les grains de la poudre aient 2^{mm} de diamètre, on trouve que la poudre brûlée avant que le boulet sorte du canon, n'arrive pas à $^1/_5$ de la poudre totale, et que, par suite, la poudre non brûlée dépasse les $^4/_5$ de la charge totale.

Il me paraît qu'il suffit d'énoncer de pareils résultats pour faire rejeter l'hypothèse dont ils découlent.

Dans ces derniers temps, on est revenu sur la question de l'influence de la pression atmosphérique sur la combustion de la poudre. En 1855 M. Mitchell, quartier-maître d'artillerie dans l'armée anglaise, communiqua à la Société Royale de Londres (*) des expériences faites à diverses hauteurs, en 1849, dans l'Inde, avec des fusées de guerre de 3 pouces ($76^{mm},2$) de longueur. Ces expériences démontrent que la durée de combustion des fusées augmente en même temps que la pression diminue. Les résultats obtenus sont les suivants :

(*) *Proceedings of the Royal Society*, vol. VII, pag. 316

STATION	Hauteur du BAROMÈTRE	Altitude	Durée de la COMBUSTION
St.-Thomas's Mount . . .	752mm, 08	Cour de l'Arsenal	14″,25
Bangalore	679, 44	914m	15, 78
Kotagherry (Monts Nilgherri)	608, 32	1981	17, 10
Cotacamund (Monts Nilgherri)	583, 68	2225	18, 125

M. Frankland a répété en 1861 (*) et confirmé les expériences de M. Mitchell. Il a opéré avec des fusées de 6 pouces (152mm, 4) de l'arsenal de Woolwich; ces fusées étaient brûlées en vase clos, dans une atmosphère qu'on raréfiait artificiellement. Pendant la combustion on travaillait à la pompe pour maintenir le plus possible la pression constante.

On obtint les résultats suivants:

Pression en millimètres de mercure	*Durée moyenne en secondes de la combustion des fusées*
722, 15	30, 33
717, 54	32, 25
652, 77	34, 75
570, 22	37, 75
499, 10	41, 50
405, 12	45, 50

(*) *Phil. Trans. of the R. Society of London for the year 1861*; vol. 151, pag. 629.

De ces expériences, et des expériences antérieures de M. Mitchell, M. Frankland déduisit que *l'accroissement de la durée de combustion est proportionnel à la diminution de pression*, et qu'on peut admettre, pour les usages de la pratique, que *la durée de combustion des fusées s'accroît d'un trentième de sa valeur, pour chaque diminution d'un pouce dans la pression*, ce qui revient, en mesures métriques, à un accroissement de 0,0013 de la durée, pour chaque diminution de 1 millimètre dans la pression.

M. Frankland ne s'est pas borné à la combustion des fusées; il a étendu ses recherches à la combustion des bougies et des jets de gaz d'éclairage, et il en a conclu que la durée de combustion des bougies et d'autres combustibles semblables, est indépendante de la pression atmosphérique, mais que leur pouvoir éclairant est proportionnel à la pression atmosphérique.

En 1862, M. L. Dufour, professeur de physique à l'Académie de Lausanne, a étudié la durée de combustion des fusées en opérant à l'air libre, et en cherchant à diverses hauteurs dans les Alpes des pressions de plus en plus faibles (*). Les fusées qui ont servi à ses expériences sont de celles destinées à produire l'explosion des shrapnells. La matière combustible y est rangée dans une rainure, presque circulaire, pratiquée dans une pièce de métal. Ces fusées étaient graduées pour durer 9 secondes. Le résultat des expériences faites entre Ouchy (380^{m}), sur les bords du lac Léman, et la crête des rochers de la Chenalettaz, au-dessus du Saint-Bernard, à 2890^{m} au-dessus du niveau

(*) *Archives des Sciences physiques et naturelles* (Bibliothèque universelle de Genève), 1862, t. XV, pag. 185.

de la mer, est que *l'accroissement de durée de la combustion est proportionnel à la diminution de pression*, et *qu'il est, en moyenne, de* 0,0011 *pour chaque diminution de* 1 *millimètre dans la pression barométrique.*

L'année suivante, 1863, M. L. Dufour répéta ses expériences sur les mêmes fusées, dans une ascension aux Diablerets (3251^{m}), sans pourtant employer des appareils de précision, et il trouva, entre Ouchy et les Diablerets, que *la durée de la combustion s'accroît de* 0,0010 *pour chaque diminution de* 1 *mill. dans la pression barométrique* (*).

Il nous est venu dans la pensée de profiter de nos courses dans les montagnes, pendant l'été, pour faire des expériences dans le même sens. Mais avant de nous y livrer, nous avons dû chercher le moyen d'éviter une difficulté que les fusées présentent.

Les fusées ordinaires, qui sont destinées à produire l'explosion des projectiles creux, ne sont pas tellement identiques, qu'elles fournissent exactement la même durée de combustion lorsqu'elles brûlent sous une même pression. Nous voyons en effet que, dans les expériences de M. Frankland, la durée des fusées, sous la pression de 30^{p},4 (772^{mm},15) variait de 30 à 31 secondes. Dans les expériences de M. Dufour, la durée, sous la pression de 728^{mm},5, variait entre 9,33 et 10,97 secondes. Ces différences tiennent au manque d'homogénéité de la charge de la fusée.

Nous avons pensé qu'on aurait pu obtenir une plus grande homogénéité par la méthode suivante de fabrication des fusées. Qu'on prenne un tube en plomb de 25^{mm} de diamètre extérieur et de 17^{mm} de diamètre intérieur; qu'on le

(*) *Archives*, 1864, t. XX, pag. 338.

remplisse de poudre à canon, et ensuite qu'on le fasse passer plusieurs fois à la filière, jusqu'à ce que sa longueur se soit augmentée dans le rapport de 1 à 25. Pendant cette opération, les interstices entre les grains de poudre disparaissent, et la poudre se réduit en une composition homogène qui brûle avec la plus grande régularité, lorsqu'on lui communique le feu. Par cette opération le tube acquiert un diamètre extérieur de $4^{mm},8$ et un diamètre intérieur de $2^{mm},8$. La poudre contenue dans 1^{m} de tube, avant l'extension, est de 243 grammes, et après de $9^{gr},720$. La densité que la composition acquiert, par le fait de cette opération, est de 1,583.

Des tubes construits de cette manière, au Laboratoire pyrotechnique de Turin, sous la direction intelligente de M. le lieut.-colonel Balegno, ont donné, en brûlant, des résultats d'une très-grande régularité. Chaque mètre de ces tubes emploie toujours le même temps, 88 secondes, pour brûler, à Turin, avec des écarts moindres qu'un tiers de seconde.

Il suffit donc de couper des longueurs égales de ces tubes, pour avoir des fusées d'une régularité bien supérieure à tout ce que l'on a fait jusqu'ici.

Pour nos expériences dans les Alpes, nous avons fait couper des morceaux de $0^{m},4$ de longueur. Le commencement et la fin de la combustion sont accusés par l'explosion d'une petite quantité de poudre de chasse, serrée dans deux morceaux de peau de mouton et fixée aux deux extrémités de la fusée. Une étoupille sort d'une extrémité de la fusée et sert d'amorce. Nous mesurions la durée de la combustion, ou l'intervalle qui sépare les deux petites explosions, à l'aide d'un compteur donnant le cinquième de seconde.

La régularité de ces fusées est telle que la durée de

leur combustion donne rarement lieu à des écarts de $^1/_5$ de seconde et, si cela arrive, la cause en est plutôt dans la difficulté d'apprécier exactement le commencement et la fin du phénomène, que dans un défaut de la fusée.

Nous étant ainsi assuré que sous la même pression la durée est presque constante, nous primes avec nous plusieurs de ces fusées que M. le lieut.-colonel Balegno eut la bonté de mettre à notre disposition, et pendant nos excursions dans les Alpes, en 1864 et 1865, nous les brûlâmes à diverses hauteurs, en ayant toujours soin de mesurer en même temps la pression atmosphérique avec un bon baromètre Fortin.

Les fusées soumises aux expériences en 1864 ne provenaient pas toutes du même tube; il y en avait dont la durée de combustion était de 36″ à Turin, et d'autres, dont la durée n'était que de 35″. Malheureusement, nous ne nous en aperçûmes que trop tard. Aussi les expériences de 1864 ne présentent pas la régularité à laquelle on pouvait s'attendre. Les fusées de 1865 proviennent toutes du même tube, et la régularité des résultats qu'elles ont fourni est bien supérieure à celle des résultats de l'année précédente.

Le tableau suivant contient les résultats que nous avons obtenus dans les années 1864 et 1865:

STATION	Altitude	Pression	Durée
		1864	
Turin.	240 mètres	736,8 millim.	36 secondes
Verzuolo	435	727,4	36,1
Entraque (vallée de Gesso)	911	688,0	37
St-Jacques (vallée de Gesso)	1229	655,6	38,1
Moschieres (vallée de Maira)	1318	654,4	38,3
M^t Ploun (vallée de Maira)	2035	600,1	40
Perabroc (vallée de Gesso)	2116	591,0	40,5
Col de la Gordolasca (vallée de Gesso)	2805	545,0	43
M^t Argentera (en dessous du sommet)	2991	539,3	43,2
Pelvo d'Elva.	3083	530,4	43,5
Cima des Gelas	3218	526,7	44,7
Monviso	3852	484,6	46
		1865	
Turin.	240	740,0	35
Verzuolo	435	724,3	35,2
Bioglio	480	726,0	35,1
Rovella (vallée de Strona)	880	694,1	36,1
Col de Tende (Auberge)	1873	618,7	38,8
Grand' Croix (Mont Cenis)	1898	610,4	39
Colla lunga (vallée de Stura)	2549	559,4	41,5
M^t Tinibres (vallée de Stura)	3046	529,4	44

Les nombres inscrits dans la colonne des durées sont la moyenne de plusieurs expériences, jamais moins de deux.

Ces résultats montrent que la raréfaction de l'air produit un accroissement dans la durée de combustion des fusées, ainsi que l'avaient déjà observé MM. Mitchell, Frankland et Dufour.

Afin de mieux saisir la loi que suit l'accroissement de la durée avec la diminution de la pression, nous avons tracé les courbes qui représentent ces résultats.

La courbe qui lie la durée à la pression étant convexe vers l'axe des pressions, il s'ensuit que la durée des

fusées augmente plus rapidement que les pressions ne diminuent. Au contraire la courbe des hauteurs correspondantes aux durées indique que les hauteurs croissent moins rapidement que les durées des fusées.

La régularité de la combustion des fusées est telle qu'on pourrait s'en servir pour mesurer la hauteur des montagnes avec une approximation à la vérité assez grossière. En prenant des fusées de 2^m de longueur, dont le prix ne dépasse guère 20 centimes, on serait presque sûr d'avoir la durée à moins de $\frac{1}{200}$ près. Or un accroissement de $\frac{1}{200}$ dans la durée correspond à un accroissement de 50^m environ dans l'élévation; ce qui permettrait de mesurer les hauteurs avec une approximation de 50^m.

C'est une méthode qui, bien qu'elle ne comporte pas autant d'exactitude que celle de l'ébullition de l'eau, est néanmoins plus commode sur les hautes montagnes; car l'observation de la durée de combustion d'une fusée exige bien moins de précautions que l'observation de la température d'ébullition, et l'appareil est d'un transport plus facile.

Il nous reste à parler de la cause qui produit l'accroissement de la durée de combustion des fusées à mesure que la pression de l'air extérieur devient moindre. Il est d'abord bien prouvé que la diminution de l'oxigène n'entre pour rien dans ce phénomène. La combustion de la matière des fusées se fait aux dépens de l'oxygène contenu dans le nitrate de potasse et non de l'oxygène de l'air. Une foule d'expériences, entre autres celles de M. Bianchi (*), prouvent que la combustion de la poudre s'effectue dans l'azote, l'acide carbonique, et autres milieux gazeux tout

(*) *Recherches sur la combustion des poudres à feu dans le vide et dans différents milieux gazeux.* Comptes rendus de l'Acad. des Sc. de Paris, t. 55, 1862, p. 97.

aussi bien que dans l'air atmosphérique. C'est donc bien à la diminution de pression qu'est dû le retard dans la combustion des fusées.

M. Frankland explique ce retard de la manière suivante. Une fusée brûle par couches successives normales à son axe, et chaque couche ne brûle que lorsqu'elle a été élevée à la température à laquelle a lieu la réaction chimique. Cette température, nécessaire à la déflagration, est dérivée des produits de la combustion de la couche précédente; et la quantité de chaleur ainsi communiquée à la couche qui va brûler dépend, en grande partie, du nombre des particules gazeuses chaudes qui viennent en contact avec cette couche. Or si la pression du milieu ambiant est réduite, le nombre de particules gazeuses, en ignition, qui viennent à chaque moment en contact avec la couche non encore en ignition, sera diminué; et par suite, la vitesse de la combustion en sera aussi diminuée.

M. Dufour pense que la pression ambiante doit avoir de l'influence sur la température même des gaz, au moment de leur production, cette température étant moindre pour des pressions moins fortes. Les gaz étant moins chauds, au moment même de leur formation, réchauffent par conséquent moins la couche de matière combustible que le feu va immédiatement envahir; la réaction chimique y est par suite plus lente.

Cette dernière explication revient, au fond, à celle donnée jadis par Saluces et D'Antoni.

Maintenant que nous sommes en possession du principe de la transformation de la chaleur en travail mécanique et en force vive, nous comprenons parfaitement que la force vive qu'acquièrent les molécules gazeuses en se répandant dans l'atmosphère, fera disparaître d'autant plus de chaleur qu'elle sera plus grande. Or la vitesse des

gaz résultant de la combustion, et par suite leur force vive est d'autant plus grande que la pression du milieu ambiant est plus petite. Donc plus cette pression est petite, plus grand sera le refroidissement qui résulte de l'expansion des gaz formés, et plus la combustion sera ralentie. Il doit même arriver un point auquel les gaz produits ne conserveront plus une température suffisante pour allumer le reste de la poudre; c'est ce qui arrive dans le vide, où la poudre prend feu, mais ne continue pas à brûler, parce que les premiers gaz formés n'ont pas une température suffisante pour communiquer le feu aux autres parties.

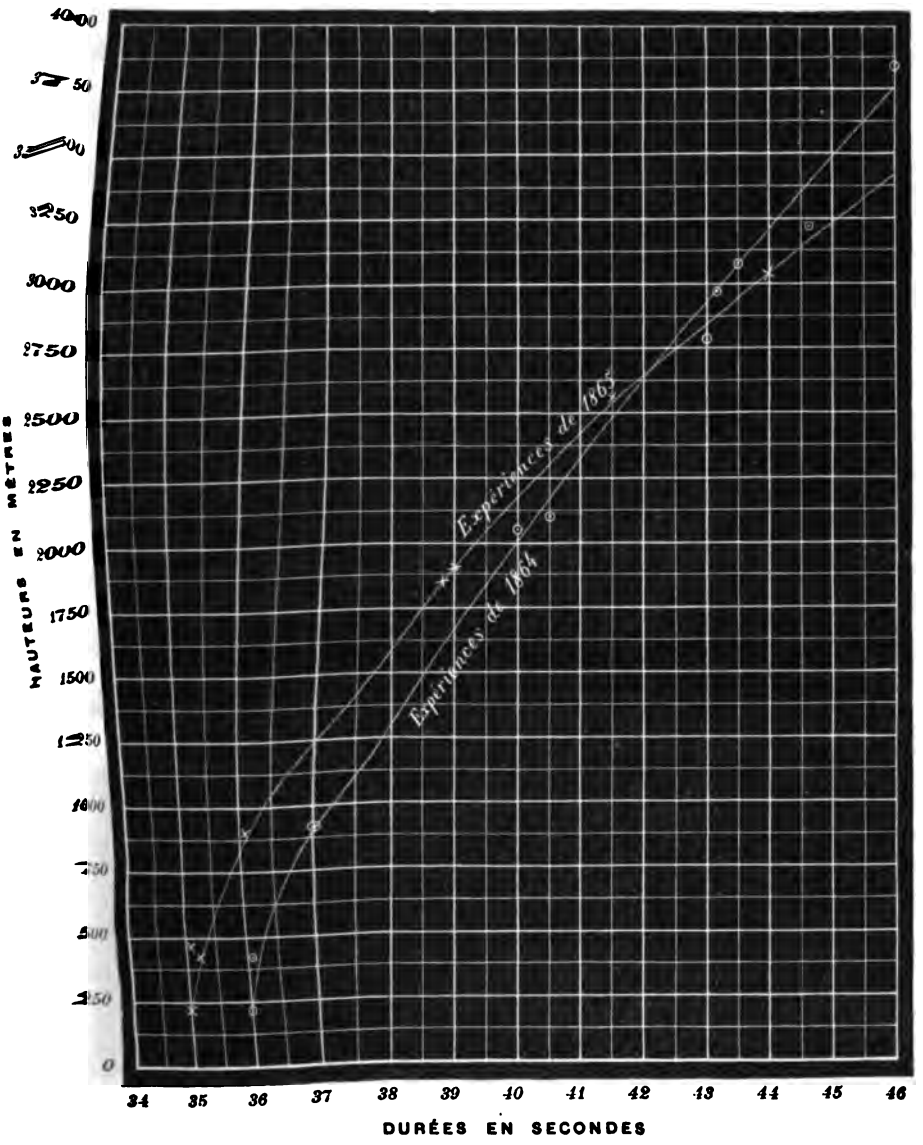
D'après cette manière de voir, il est à présumer que la courbe qui représente la relation entre la durée des fusées et la pression est asymptotique aux deux axes des coordonnées, c'est-à-dire qu'à une pression nulle doit correspondre une durée infiniment grande, et qu'à une pression infiniment grande doit correspondre une durée infiniment petite.

Les expériences précédentes ne nous font connaître qu'un arc très-petit de la courbe des durées; il serait très-intéressant de pouvoir prolonger cet arc, surtout du côté des pressions plus élevées qu'une atmosphère; car la connaissance des variations que subit la vitesse de combustion de la poudre, selon les pressions, est une donnée indispensable pour le calcul des effets des charges de poudre dans les armes à feu.

Cette recherche aurait donc une haute importance tant au point de vue scientifique qu'au point de vue militaire. Nous savons que l'exécution de ces expériences présente d'assez grandes difficultés pratiques, mais nous pensons que les grands réservoirs d'air comprimé dont on dispose au percement des Alpes, pourraient être d'un grand secours dans de pareilles recherches.

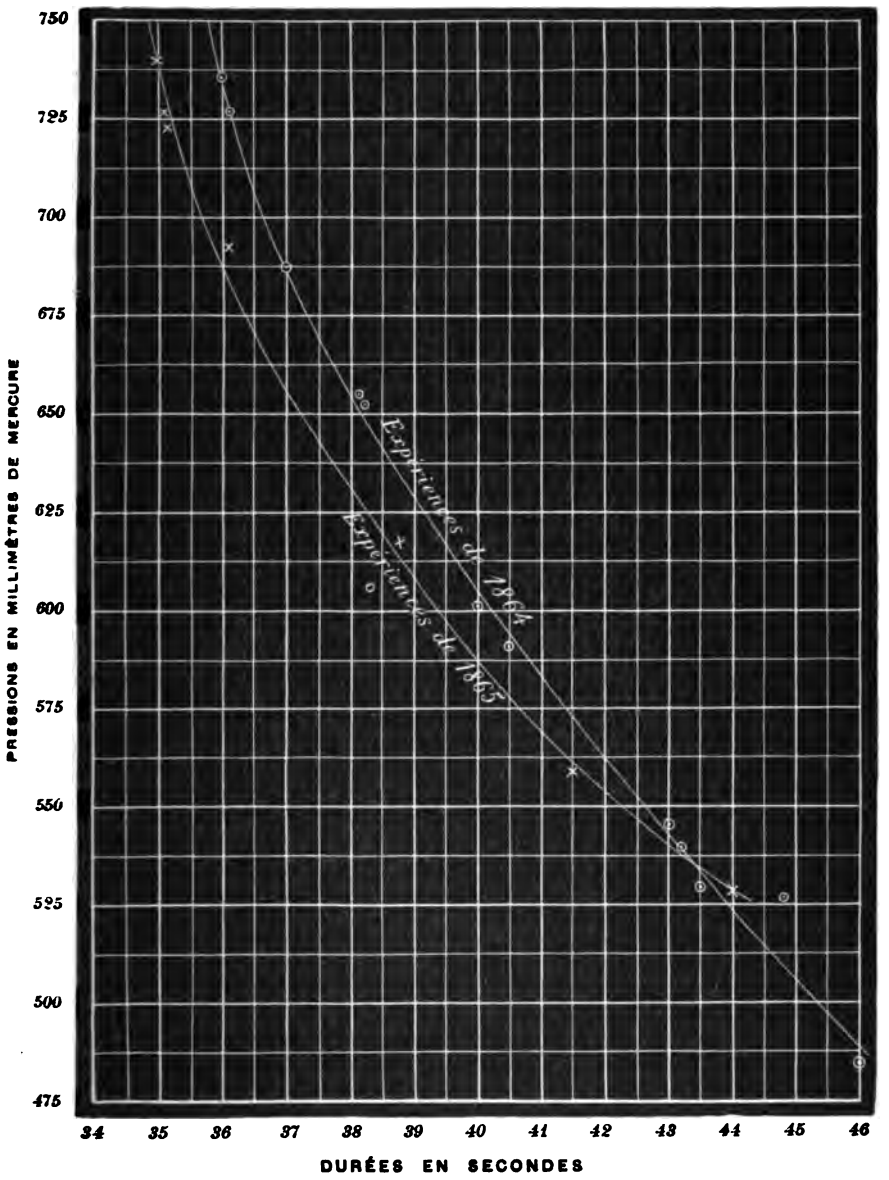
COURBE

représentant la relation entre la hauteur au-dessus du niveau de la mer et la durée de combustion des fusées.



COURBE

représentant la relation entre la pression atmosphérique et la durée de combustion des fusées.



BALISTIQUE INTÉRIEURE

BALISTIQUE INTÉRIEURE.

PRÉFACE.

Une arme à feu est une machine thermique destinée à convertir en force vive une partie de la chaleur dégagée par la réaction chimique d'un agent explosible.

La science qui traite du mouvement des projectiles dans l'intérieur des armes à feu prend le nom de *Balistique intérieure*, pour la distinguer de la *Balistique extérieure* qui étudie le mouvement du projectile, lorsqu'il est sorti de l'arme.

Dans la solution qu'on a donnée jusqu'ici du problème de la Balistique intérieure, on fait abstraction de la chaleur qui disparaît pendant la communication du mouvement au projectile. Or, c'est précisément cette chaleur qui est la cause de la force vive imprimée au projectile. A

moins d'emprunter de la chaleur au dehors, il est absolument impossible que les fluides élastiques engendrés par la combustion de la charge puissent conserver la même température tout en imprimant une force vive au projectile. C'est le contraire qui arrive dans le tir d'une arme à feu; car les parois de l'arme, au lieu de céder de la chaleur aux gaz de la poudre, leur en soustraient une quantité considérable.

On voit donc que la méthode ordinaire de traiter ce problème ne répond plus à l'état actuel de nos connaissances sur la chaleur, et qu'il y a lieu de le reprendre sous un autre point de vue. C'est ce que nous avons tenté de faire dans le mémoire suivant qui a paru la première fois, dans nos *Principes de Thermodynamique* (*), et que nous reproduisons ici, avec quelques additions destinées à le rendre indépendant des théories qui le précèdent dans le livre d'où il est extrait.

(*) Turin, chez Cassone, 1865. — 2ème édition, Turin et Florence, chez Loescher, 1870.

MOUVEMENT DES PROJECTILES

DANS LES ARMES À FEU.

Lorsqu'on met le feu à un corps explosible, il se produit entre ses éléments une réaction chimique à la suite de laquelle il se transforme en une masse fluide aériforme, qui tend à se dilater.

Si le corps explosible est enfermé dans une capacité close dont les parois ont une épaisseur suffisante pour résister, sans s'ouvrir, à la pression des gaz dégagés, les produits de la décomposition restent emprisonnés dans la capacité où ils se sont formés, en perdant peu à peu, par conductibilité, leur chaleur. Les produits solides et liquides qui, dans les premiers moments, en raison de la haute température, avaient la forme gazeuse, se déposent successivement sur les parois, et il ne reste plus à la fin que les gaz permanents qui continuent à presser les parois à la température ordinaire.

Mais si les parois de la capacité contenant le corps explosible n'ont pas une résistance suffisante, l'explosion les fera éclater et en lancera violemment les débris dans tous les sens. C'est ce qui arrive dans les projectiles creux.

On se tromperait en croyant que la projection des éclats est produite par la seule pression exercée contre les parois au moment de la rupture. C'est la détente successive des gaz, passant graduellement de la tension qui a produit la rupture à la pression atmosphérique, qui imprime le mouvement aux éclats.

Si un vase contenant un liquide, à une forte pression, vient à éclater, les débris n'en sont point lancés au loin. En effet, le liquide, étant très-peu compressible, ne continue pas, après la rupture, à agir pour accélérer le mouvement des éclats. Mais si le liquide est à une haute température, comme dans les chaudières à vapeur, alors il y a projection des fragments: car immédiatement après la rupture du vase, la vapeur en s'échappant produit une diminution de la pression sur l'eau, de sorte qu'il se fait une nouvelle émission de vapeur qui accélère le mouvement des éclats. La pression sur l'eau diminuant encore, il se fait une autre émission de vapeur; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'enfin la température se réduisant à celle de l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique, l'excès de la pression de la vapeur sur la pression atmosphérique devient nulle.

C'est à l'aide du ressort des gaz dégagés par l'explosion de la poudre qu'on parvient à imprimer de grandes vitesses aux projectiles. Dans le tir des armes à feu, il n'y a de fixe que les parois de l'âme, qui empêchent l'expansion des gaz dans le sens perpendiculaire à l'âme, tandis que le projectile et le fond de l'âme n'étant pas reliés ensemble prennent des mouvements en sens opposés. Dans ce cas les gaz produits par la combustion de la charge pressent le projectile avec des forces qui, partant de zéro, croissent d'une manière extrêmement rapide, jusqu'à un maximum, puis décroissent à mesure que le projectile s'avance.

En même temps que les gaz, en poussant le projectile et l'arme en sens contraire l'un de l'autre, leur impriment des vitesses croissantes, il disparaît une certaine quantité de chaleur qui se transforme en force vive. Pour parvenir à la détermination de ces vitesses, il est donc nécessaire de tenir compte de la disparition de chaleur qui a lieu. C'est ce qu'on ne fait pas ordinairement, et ce que nous avons essayé de faire, ainsi qu'on va le voir.

Équations générales. — La combustion d'une charge de poudre dégage une certaine quantité de chaleur qu'on peut déterminer, soit d'après la connaissance des réactions accomplies, soit par des expériences calorimétriques directes.

Considérons le projectile au sortir de l'âme, et nommons :

m la masse du projectile;

k son rayon de gyration par rapport à l'axe de figure;

m' la masse de l'arme y compris son affût;

μ la masse de la charge;

u la vitesse du projectile au sortir de l'âme;

ω la vitesse angulaire du projectile au même instant;

u' la vitesse de l'arme au même instant;

v la vitesse variable des différentes parties de la charge réduite en gaz au même instant;

R la résistance de l'air sur le projectile parvenu à la distance s de sa position initiale;

v_0 le volume de l'âme derrière le projectile à l'origine;

v le volume de l'âme entière;

P la pression atmosphérique;

H_0 la quantité de chaleur dégagée par la combustion de la charge, depuis le commencement, jusqu'à l'instant où le projectile atteint la tranche de la bouche;

H la quantité de chaleur contenue dans la masse gazeuse, à l'instant où le projectile sort de l'âme, au-dessus de celle que contient la charge avant l'explosion; ou, en d'autres termes, la quantité de chaleur qu'on recueillerait en refroidissant cette masse gazeuse, dans un calorimètre, jusqu'à la température ordinaire, sans lui permettre d'exécuter un travail quelconque (*);

Q la quantité de chaleur absorbée par les parois de l'âme.

En vertu du principe fondamental de la Thermodynamique, que la chaleur disparue dans un phénomène quelconque est l'équivalent de la somme du travail intérieur, du travail extérieur développés et de l'accroissement de la demi-force vive du système, si l'on désigne par J l'équivalent mécanique de la chaleur, ou, en d'autres termes, le nombre de kilogrammètres correspondant à une calorie, on aura

$$2J(H_0 - H - Q) = mu^2 + mk^2\omega^2 + m'u'^2 + \int v^2 d\mu + 2P(v - v_0) + 2\int R\,ds,$$

(*) La manière avec laquelle on refroidit la masse gazeuse n'est pas indifférente. On croyait autrefois que la chaleur reçue de l'extérieur, ou émise au dehors par un corps passant de la pression p_0 et du volume v_0 à la pression p_1 et au volume v_1 ne dépendait que de l'état initial et final. C'est ce qu'admettaient tous les physiciens et les géomètres de la génération passée : les Laplace, les Poisson, etc. Aujourd'hui qu'il est bien prouvé que tout travail coûte de la chaleur, on comprend que si le passage du corps du premier état au second est accompagné d'un travail mécanique, exercé par lui sur les corps ambiants ou par les corps ambiants sur lui, la chaleur disparue ou apparue variera suivant que le travail actif ou passif est plus ou moins grand; ou, en d'autres termes, que la chaleur dépend du chemin que suivent les deux variables indépendantes p, v pour passer de la valeur initiale p_0, v_0 à la valeur finale p_1, v_1.

où le premier membre exprime le double de l'équivalent mécanique de la chaleur disparue pendant le phénomène, le terme mu^2 exprime la force vive de translation du projectile, $mk^2\omega^2$ la force vive de rotation du projectile, $m'u'^2$ la force vive de l'arme et de son affût, $\int v^2 d\mu$ la force vive de la masse gazeuse, $P(v - v_0)$ le travail dépensé pour surmonter la pression de l'atmosphère, $\int R ds$ le travail dépensé pour imprimer aux molécules de l'air atmosphérique les vitesses avec lesquelles elles s'écartent du projectile.

L'intégrale $\int v^2 d\mu$ devra s'étendre à toute la masse gazeuse depuis le fond de l'âme, jusqu'à la tranche de la bouche; l'intégrale $\int R ds$ devra s'étendre depuis la position initiale du projectile contre la charge, jusqu'à sa sortie de l'âme.

La masse gazeuse étant formée en plus grande partie de gaz permanents dont le travail intérieur est nul, ou du moins peut être considéré comme tel, nous avons négligé le travail intérieur de la masse μ, qui devrait être ajouté au second membre de l'équation. Mais, si la charge au lieu d'être formée d'un corps qui, à l'instant de l'explosion, se transforme en gaz permanents où le travail intérieur est négligeable, consistait en un corps qui passât à l'état de vapeur, comme le serait, par exemple, une charge formée d'eau à une haute température, il ne serait plus permis de faire abstraction du travail intérieur. Dans nos *Principes de Thermodynamique*, pag. 278, nous avons traité le cas de la vapeur d'eau employée pour lancer les projectiles.

Nous n'avons pas fait entrer en ligne de compte le travail consommé par le frottement du projectile contre les parois de l'âme, travail qui doit être assez considérable dans les armes rayées, parce que ce travail se transforme en chaleur qui est restituée ensuite à la masse gazeuse. De même, dans une machine à vapeur, on ne tient point

compte du frottement du piston contre les parois du cylindre, parce que le travail perdu de la sorte se convertit de nouveau en chaleur laquelle est restituée à la vapeur.

Eu égard à la manière par laquelle, dans les armes rayées, le projectile acquiert le mouvement de rotation, la vitesse angulaire ω est proportionnelle à la vitesse de translation u.

En effet, si l'on désigne par b le pas des hélices, le projectile, au sortir de l'arme, fera sur lui-même, dans chaque unité de temps, un nombre de révolutions égal à

$$\frac{u}{b};$$

de sorte que la vitesse d'un point lié au projectile et situé à une distance de l'axe égale à l'unité de longueur, ou la vitesse qu'on nomme angulaire, sera

$$\omega = \frac{2\pi u}{b}.$$

Ainsi il faudra remplacer

$$mk^2\omega^2 \qquad \text{par} \qquad m\left(\frac{2\pi k}{b}\right)^2 u^2.$$

Si l'on désigne par n le rapport de la circonférence $2\pi k$, décrite avec le rayon de gyration, au pas b, ou, en d'autres termes, si l'on fait

$$\frac{2\pi k}{b} = n,$$

l'équation ci-dessus deviendra

$$[1] \qquad 2J(H_0 - H - Q) = (1 + n^2)\, mu^2 + m'u'^2 + \int v^2 d\mu + 2P(v - v_0) + 2\int R\, ds.$$

On obtient une seconde relation entre les vitesses u et u' en appliquant le principe relatif à la quantité de mouvement d'un système matériel, d'après lequel l'accroissement de la somme des quantités de mouvement projetées sur un axe quelconque est:

1° Égal à la somme des impulsions des forces extérieures projetées sur le même axe;

2° Indépendant des actions mutuelles.

Dans notre cas particulier, les forces extérieures sont la pression constante P de l'atmosphère et la résistance variable R de l'air.

Ainsi l'on aura, en désignant par t le temps,

$$[2] \qquad mu - m'u' + \int v\,d\mu - Pt - \int R\,dt = 0.$$

Cette équation, jointe à l'équation [1], donne la solution complète du problème de la détermination des vitesses imprimées simultanément par la combustion de la charge de poudre au projectile, à l'arme et aux gaz de la charge.

Les deux intégrales

$$\int v\,d\mu, \qquad \int v^2\,d\mu$$

exprimant la quantité de mouvement et la force vive de la masse gazeuse, dépendent de la manière dont les gaz sont disposés dans l'intérieur de l'âme, ainsi que des vitesses de leurs particules, au moment où le projectile quitte l'arme.

Cas où la densité des gaz est constante dans tout l'espace qu'ils occupent au moment où le projectile sort de l'arme, et où les vitesses dont sont animées leurs

particules croissent uniformément depuis le fond de l'âme jusqu'à la bouche de l'arme. — C'est un problème assez difficile que celui de déterminer la loi suivant laquelle les gaz de la poudre sont répartis dans l'âme, et les vitesses dont leurs particules sont animées. Pour le moment nous supposerons que la densité des gaz est constante dans tout l'espace qu'ils occupent à l'instant où le projectile quitte l'arme; que les tranches extrêmes qui pressent le projectile et la culasse sont animées respectivement de la même vitesse que ces mobiles; et que les vitesses des tranches intermédiaires vont en croissant uniformément à partir du fond de l'âme jusqu'à la bouche.

Cela posé, il est clair que la tranche située entre les deux tranches extrêmes, qui divise la distance entre celles-ci en parties proportionnelles aux vitesses u et u', est en repos; et que les vitesses des différentes tranches sont en raison des distances de ces tranches à la tranche qui reste immobile.

Si nous nommons L la longueur de l'âme, la tranche immobile sera située à la distance

$$\frac{u'L}{u+u'}$$

du fond de l'âme, et à la distance

$$\frac{uL}{u+u'}$$

de la bouche.

Si nous considérons deux tranches correspondantes, des deux côtés de la tranche immobile, aux distances x, y de celle-ci, la vitesse de la tranche du côté de la bouche sera

$$\frac{x}{\frac{uL}{u+u'}}u,$$

ou bien

$$\left(\frac{u+u'}{L}\right)x\,;$$

et la vitesse de celle du côté de la culasse

$$\frac{\frac{y}{u'L}}{u+u'}u',$$

ou bien

$$\left(\frac{u+u'}{L}\right)y.$$

On aura donc

$$v=\left(\frac{u+u'}{L}\right)x\,;$$

$$v'=\left(\frac{u+u'}{L}\right)y.$$

La quantité de mouvement des tranches de gaz qui se meuvent dans le sens du projectile sera

$$\delta\Omega\left(\frac{u+u'}{L}\right)\int x\,dx\,,$$

en désignant par δ la densité uniforme du gaz, et par Ω la section de l'âme, l'intégrale étant prise entre $x=0$ et

$$x=\frac{uL}{u+u'}.$$

La quantité de mouvement des gaz qui se meuvent dans le sens de l'arme, sera

$$\delta\Omega\left(\frac{u+u'}{L}\right)\int y\,dy\,,$$

l'intégrale devant être prise depuis $y = 0$, jusqu'à

$$y = \frac{u' L}{u + u'}.$$

En effectuant les intégrations entre ces limites, il vient, pour les deux quantités de mouvement,

$$\frac{\delta \Omega L}{2} \left(\frac{u^2}{u + u'} \right),$$

$$\frac{\delta \Omega L}{2} \left(\frac{u'^2}{u + u'} \right),$$

et pour leur différence

$$\frac{\delta \Omega L}{2} (u - u').$$

Or, le produit $\delta \Omega L$ représente la masse totale des gaz qu'on a désignée par μ; on aura donc

$$\int v \, d\mu = \frac{\mu}{2} (u - u').$$

D'une manière semblable, on trouvera pour la somme des forces vives des tranches qui se meuvent dans le sens du projectile

$$\delta \Omega \left(\frac{u + u'}{L} \right)^2 \int x^2 \, dx$$

entre $x = 0$ et

$$x = \frac{u L}{u + u'};$$

et, pour la somme des forces vives des tranches qui se meuvent dans le même sens que l'arme,

$$\delta\Omega\left(\frac{u+u'}{L}\right)^2\int y^2 dy$$

entre $x=0$ et

$$y=\frac{u'L}{u+u'}.$$

En effectuant les intégrations, on obtient

$$\frac{\delta\Omega L}{3}\left(\frac{u^3}{u+u'}\right),$$

$$\frac{\delta\Omega L}{3}\left(\frac{u'^3}{u+u'}\right);$$

de sorte que la somme totale des forces vives des molécules gazeuses sera

$$\frac{\delta\Omega L}{3}\left(\frac{u^3+u'^3}{u+u'}\right);$$

et puisque

$$\mu=\delta\Omega L,$$

on aura enfin

$$\int v^2 d\mu=\frac{\mu}{3}\left(\frac{u^3+u'^3}{u+u'}\right),$$

ou bien

$$\int v^2 d\mu=\frac{\mu}{3}(u^2+u'^2-uu').$$

Venons aux termes

$$\int R\,ds, \qquad \int R\,dt, \qquad Pt$$

qui représentent : le premier, la demi-force vive que le projectile imprime aux molécules gazeuses de l'atmosphère, dans son mouvement le long de l'âme; le deuxième, l'impulsion due à la résistance de l'air pendant le temps que le projectile parcourt l'âme; le troisième, l'impulsion due à la pression atmosphérique pendant le même temps. Nous poserons la force R égale à la masse m du projectile, multipliée par le carré de la vitesse et divisée par $2c$, c étant un coefficient constant qui dépend de la figure du projectile et de la densité de l'air.

Pour évaluer ces trois termes, il faudrait connaître la valeur de la vitesse en fonction du temps. Afin de simplifier la question nous supposerons que la vitesse du projectile croît proportionnellement avec le temps depuis zéro jusqu'à la valeur u qu'elle a à la bouche. On aura de la sorte

$$u = at,$$

$$s = \frac{at^2}{2};$$

d'où l'on tire

$$t = \frac{2s}{u}, \qquad u^2 = 2as;$$

et, par suite,

$$\int R\,ds = \int \frac{mu^2\,ds}{2c} = \int \frac{mas\,ds}{c} = \frac{mu^2 s}{4c},$$

$$\int R dt = \int \frac{mu^2 dt}{2c} = \int \frac{ma^2 t^2 dt}{2c} = \frac{mus}{3c},$$

$$Pt = P\frac{2s}{u}.$$

Ces intégrales doivent s'étendre depuis la position initiale du projectile contre la charge, jusqu'à son arrivée à la bouche. Si l'on désigne par l la distance de la tranche de la bouche de l'arme à la charge, les limites des intégrales seront zéro et une quantité légèrement plus petite que l, parce que l'arme recule pendant que le projectile parcourt l'âme; mais qu'on pourra prendre égale à l sans erreur sensible. On aura donc

$$\int R ds = \frac{mu^2 l}{4c},$$

$$\int R dt = \frac{mul}{3c},$$

$$Pt = \frac{2Pl}{u}.$$

Par conséquent, on aura, pour déterminer les vitesses du projectile et de l'arme, produites par la combustion de la charge de poudre, les deux équations

$$\left(1 + n^2 + \frac{\mu}{3m} + \frac{l}{2c}\right) mu^2 + \left(1 + \frac{\mu}{3m'}\right) m'u'^2 - \frac{\mu}{3} uu'$$
$$= 2J(H_0 - H - Q) - 2P(v - v_0),$$

$$\left(1 + \frac{\mu}{2m} - \frac{l}{3c}\right) mu - \left(1 + \frac{\mu}{2m'}\right) m'u' - \frac{2Pl}{u} = 0.$$

Ces équations sont générales et ne reposent que sur deux hypothèses: 1° que les gaz aient une densité constante dans tout l'espace qu'ils occupent dans l'âme quand le projectile est à la bouche; 2° qu'au même instant les tranches de la masse gazeuse aient des vitesses croissant uniformément à partir du fond de l'âme, depuis la vitesse négative du recul, jusqu'à la vitesse positive du projectile.

Nous mentionnons à peine l'autre supposition, faite pour calculer les intégrales

$$\int R ds, \qquad \int R dt, \qquad Pt$$

représentant celles-là la demi-force vive et l'impulsion dues à la résistance de l'air, celle-ci l'impulsion de la pression atmosphérique, parce que leurs valeurs sont toujours fort petites comparativement aux autres termes de ces équations.

La détermination de la quantité de mouvement et de la force vive des gaz de la poudre exige la connaissance de la loi suivant laquelle ils sont répartis dans l'âme, et des vitesses dont leurs particules sont animées. — Lorsque les deux conditions ci-dessus ne sont point remplies, les valeurs des quantités

$$\int v d\mu, \qquad \int v^2 d\mu$$

différeront de celles que nous avons trouvées. On conçoit que ce cas puisse arriver, par exemple, lorsque, dans l'état initial, il existe un espace vide entre la charge et le projectile. Alors, les premiers gaz qui se développent se précipitent avec une très-grande vitesse dans l'espace vide,

rencontrent le projectile immobile et sont refoulés contre lui. Il doit se produire, dans ce cas, entre le projectile et le fond de l'âme des ondes où les gaz seront tour à tour condensés et raréfiés; de sorte que la disposition des gaz, à l'instant où le projectile arrive à la bouche, peut être différente de celle que nous avons supposée.

Si le projectile en arrivant à la bouche a une vitesse moindre que celle des gaz par lesquels il est chassé en avant, la valeur de la force vive de ceux-ci sera plus grande que celle que nous lui avons attribuée et, par suite, la force vive du projectile et de l'arme en sera d'autant amoindrie. Mais, dans ce cas, ce qui est gagné par les gaz en force vive, est perdu par le projectile et par l'arme.

En tout cas, les deux équations

$$(1+n^2)\,mu^2+m'u'^2+\int v^2\,d\mu+2\int R\,ds = 2J\,(H_0-H-Q)-2P\,(v-v_0),$$

$$mu-m'u'+\int v\,d\mu-\int R\,dt-Pt=0,$$

subsistent toujours; seulement nous ne pouvons déterminer les intégrales

$$\int v\,d\mu, \qquad \int v^2\,d\mu,$$

sans connaître la manière dont les molécules gazeuses sont réparties dans l'espace qu'elles occupent, et les vitesses dont elles sont animées.

Chaleur contenue dans les gaz à la bouche de l'arme. — La chaleur initiale H_0, dégagée par la combustion de

la poudre, peut, comme nous l'avons déjà dit, être déterminée soit directement au moyen de mesures calorimétriques, soit indirectement d'après la connaissance des quantités de chaleur dégagées et absorbées dans les réactions qui s'accomplissent dans l'acte de la combustion de la charge.

La quantité de chaleur H, contenue dans la masse gazeuse au sortir du projectile de l'âme, est assez difficile à déterminer expérimentalement; mais elle peut être calculée indirectement au moyen de l'accroissement du volume de cette masse en passant de l'état initial à l'état final. A cet effet, nous allons invoquer un autre principe de mécanique qui établit la relation entre le travail et la force vive. Suivant ce principe, l'accroissement de la demi-force vive d'un système, entre deux situations quelconques, est égal au travail des forces extérieures, entre ces deux situations, plus à celui des forces intérieures mutuelles. En appliquant ce principe à notre cas, et désignant par p la pression des gaz de la poudre sur l'unité de surface, et par v le volume, nous aurons

$$(1+n^2)\,mu^2 + m'u'^2 + \int v^2 d\mu \quad .$$
$$= 2\int p\,dv - 2P\,(v - v_0) - 2\int R\,ds\,,$$

où l'intégrale $\int p\,dv$ représente le travail développé par les actions mutuelles des points du système, qui, dans notre cas, se réduit au travail développé par la détente des gaz de la charge.

En comparant cette équation à l'équation [1], on en déduit

$$J\,(H_0 - H - Q) = \int p\,dv\,,$$

ou bien

$$-Jd\ (H+Q)=pdv.$$

Dans un gaz permanent la quantité de chaleur H est proportionnelle au produit pv, c'est-à-dire qu'on a

$$H=apv,$$

a étant une constante qui ne dépend point de la nature du gaz. Si l'on élimine la pression p entre les deux dernières équations, il vient

$$-\frac{p\,(H+Q)}{H}=\frac{1}{aJ}\frac{dv}{v}.$$

Pour intégrer cette équation, il faudrait connaître la quantité de chaleur Q communiquée à l'arme en fonction de H. Malheureusement cette quantité n'est pas aussi petite qu'on pourrait d'abord le présumer, ainsi qu'on le verra par la suite, de sorte qu'on ne peut pas la négliger. Pour le moment, nous la supposerons constante, ou, en d'autres termes, nous ferons

$$dQ=0.$$

L'équation étant réduite à

$$-\frac{dH}{H}=\frac{1}{aJ}\frac{dv}{v},$$

donnera par l'intégration, à partir de l'état initial, si l'on suppose $Q=0$,

$$\log\frac{H_0}{H}=\frac{1}{aJ}\log\frac{v}{v_0},$$

ou bien

$$\frac{H_0}{H} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{\frac{1}{aJ}}.$$

C'est la loi suivant laquelle la chaleur intérieure varie avec le volume lorsqu'une masse gazeuse se détend, sans addition ni soustraction de chaleur du dehors, tout en effectuant un travail extérieur. Nous désignerons dorénavant par β la constante $\frac{1}{aJ}$. Pour en trouver la valeur, nous rappellerons que, d'après M. Regnault, un mètre cube d'air atmosphérique, à zéro degrés, sous la parallèle de 45° et au niveau de la mer, pèse $1^k,292743$; qu'il se dilate de 0,00367 pour chaque accroissement de température d'un degré ; et qu'un kilogramme d'air absorbe 0,2375 calories pour passer de zéro à la température d'un degré, sous la pression atmosphérique. Cela posé, prenons un kilogramme d'air à zéro degrés, sous la pression atmosphérique

$$P = 10.333^k,$$

et chauffons-le de manière à en augmenter la température d'un degré. La quantité de chaleur $0^{cal},2375$ qu'il absorbera se divise en deux parties: l'une se transformera en travail pour surmonter la pression atmosphérique; l'autre partie restera dans l'air à l'état de chaleur en s'ajoutant à la chaleur interne préexistante.

Si avant l'échauffement on avait

$$H = aPV$$

on aura après cette opération

$$H + 0.2375 - \frac{1}{J}(0.00367)PV = aPV(1 - 0.00367).$$

où le terme

$$(0{,}00367)\, PV$$

exprime le travail développé par la détente de l'air, sous la pression constante P, pour passer du volume V au volume

$$V(1 + 0{,}00367).$$

On en déduit, par la soustraction,

$$0{,}2375 - \frac{1}{J}(0{,}00367)\, PV = (0{,}00367)\, aPV,$$

et par suite

$$aJ = \frac{(0{,}2375)\, J}{(0{,}00367)\, Pv} - 1.$$

En prenant l'équivalent de la chaleur

$$J = 425 \text{ kilogrammètres},$$

et observant que, d'après les valeurs ci-dessus,

$$V = \frac{1}{1{,}292743},$$

on trouve

$$aJ = 2{,}4409$$

et, par conséquent,

$$\beta = \frac{1}{aJ} = 0{,}40965.$$

On prend ordinairement

$$\beta = 0{,}41,$$

valeur qui s'accorde avec celle qu'on déduit de la vitesse du son dans l'air.

La relation

$$\frac{H_0}{H} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{\beta}$$

suppose implicitement que les parois de l'âme sont imperméables à la chaleur. Si l'on supposait que la chaleur Q qui est absorbée par le métal du canon le fût, tout en un coup, à l'instant que le projectile se met en mouvement, alors il faudrait remplacer H_0 par $H_0 - Q$, parce que celle-ci serait la chaleur qui correspond à v_0, et l'on aurait

$$\frac{H_0 - Q}{H} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{\beta}.$$

La valeur de H que fournit la première relation est trop grande et, au contraire, celle que fournit la seconde est trop petite. La véritable valeur se trouve comprise entre les deux.

La perte de chaleur de la masse gazeuse pendant que le projectile parcourt l'âme sera, dans le premier cas,

$$H_1 - H = H_1 \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta}\right]$$

et, dans le second,

$$H_1 - H - Q = H_1 - Q \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta}\right].$$

La première est trop forte et, étant substituée dans l'équation [illegible] conduira à une vitesse initiale du projectile

exagérée; au contraire la seconde est trop faible, et conduira à une vitesse initiale inférieure à la véritable.

Echauffement divers de l'arme, suivant le mode de chargement. — Il importe de remarquer que les relations que nous venons de trouver entre la quantité de chaleur finale des gaz et le rapport des volumes à l'origine et à la fin du phénomène, supposent que la détente se fait avec production de travail. Elles ne seraient plus exactes, si une partie de la force vive, produite par l'expansion, était transformée de nouveau en chaleur, au moyen du frottement réciproque des particules gazeuses.

Pour éclaircir ceci, supposons pour un instant que le projectile soit arrêté à une certaine distance du fond de l'âme, de manière à laisser derrière lui un espace libre où les gaz de la poudre puissent se répandre. Dans ce cas les gaz qui se dégagent de la poudre en se précipitant dans cet espace libre, acquerront une certaine force vive et se refroidiront d'une quantité équivalente; mais ensuite, après avoir choqué contre le projectile et les parois de l'âme, ils reviendront en arrière, et après un va-et-vient plus ou moins long, ils seront réduits au repos par le frottement mutuel de leurs particules. Lorsque tout sera réduit au repos, la température de la masse gazeuse reviendra à son état initial. Il arrivera ici ce qui arrive dans la célèbre expérience de M. Joule que nous avons décrite ailleurs (*).

Dans le cas réel, le projectile n'est pas arrêté d'une manière complète, il peut avancer; mais l'on conçoit qu'une partie de la force vive acquise par les gaz puisse être convertie de nouveau en chaleur par le frottement réciproque

(*) Voyez nos *Principes de Thermodynamique*, 2e édition, page 52.

des particules qui rencontrent les parois de l'âme, et le projectile qui a une vitesse moindre que ces particules.

Ces considérations nous expliquent pourquoi, lorsqu'on laisse un espace entre le projectile et la poudre, la vitesse finale du projectile est moindre que lorsqu'il touche la poudre dans sa position initiale, bien que la détente des gaz dégagés de la poudre soit la même. Dans ce cas, une partie de la force vive acquise au commencement par les particules gazeuses est reconvertie en chaleur, de sorte que la température finale des gaz, quand le projectile sort de l'arme, est plus élevée que dans le cas où le projectile à l'origine touchait la poudre.

On conçoit par là qu'une arme dont le projectile ne touche point la poudre doit s'échauffer plus que celle où le projectile toucherait la poudre.

Nous ne croyons pas que cet effet ait été jamais signalé. Ce qui avait été observé jadis par Rumford, c'est qu'une arme s'échauffe plus par le tir à poudre que par le tir à balle. Il expérimentait avec un canon de fusil dans lequel il introduisait toujours la même charge de poudre, et tantôt il n'y mettait pas de balle, tantôt il y en plaçait une, deux, trois et même quatre les unes sur les autres. « J'étais » dans l'habitude, dit-il, de saisir avec la main gauche le » canon, aussitôt après chaque décharge, pour le tenir pendant que je l'essuyais en dedans avec une baguette garnie d'étoupes; et j'étais fort surpris de trouver que le » canon était beaucoup plus échauffé par l'explosion d'une » charge de poudre donnée, quand il n'y avait point de » balle devant la poudre, que quand une ou plusieurs balles étaient chassées par la charge » (*).

(*) *Mémoires sur la chaleur*. Paris, an XIII — 1804. *Notice historique*, p. IX.

L'explication de ce fait ressort des considérations mêmes que nous avons exposées ci-dessus. En effet, lorsqu'on tire à poudre, les particules gazeuses qui se dégagent de la poudre ne rencontrant point d'obstacle, vont choquer les parois avec de très-grandes vitesses, rebondissent, s'entrechoquent et finissent, au moyen de leur frottement mutuel, par reconvertir une partie de la force vive en chaleur.

Suivant nous, la raison qu'on donne ordinairement du plus grand échauffement produit par le tir à poudre que par le tir à balle n'est pas exacte. On dit que, dans le tir à balle, la force vive acquise par la balle représente une quantité équivalente de chaleur qui a dû disparaître pendant le phénomène, quantité qui reste à l'état de chaleur dans le tir à poudre; mais on ne réfléchit pas que, dans celui-ci, les gaz de la poudre acquièrent une force vive bien plus grande que dans le tir à balle. A moins que dans le tir à poudre une partie de la force vive des gaz ne soit transformée en chaleur, par leur frottement réciproque, il doit arriver que l'excès de la force vive des gaz, dans le tir à poudre, sur celle des gaz dans le tir à balle, sera précisément égal à la force vive de la balle; car le travail développé par la détente de la masse gazeuse, qui est égal à la demi-somme des forces vives acquises, ne dépend que du rapport du volume initial au volume final, lorsque aucune partie de ce travail n'est reconvertie en chaleur par le frottement.

Si l'explication que nous combattons était la véritable, il s'ensuivrait que le tir avec une balle éloignée de la charge devrait échauffer moins le canon que le tir sans balle; car la force vive qu'aurait cette balle, bien qu'inférieure à celle d'une balle mise d'abord en contact avec la poudre, serait cependant acquise aux dépens de la chaleur des gaz.

En bonne, l'expérience s'est prononcée de la manière la plus décisive à cet égard. Le tir à poudre a échauffé le canon plus que le tir avec une balle placée en contact avec la poudre, mais moins que le tir avec une balle située près de la bouche.

Expériences sur l'échauffement produit par le tir dans des circonstances diverses. — M. le général Ricotti, Directeur général des armes spéciales au Ministère de la Guerre, à qui nous nous sommes adressé, a bien voulu donner l'ordre à M. le lieutenant-colonel chev. Balegno, directeur du Laboratoire Pyrotechnique, de faire exécuter les expériences suivantes.

Trois fusils rayés en acier, autant que possible égaux, ont été tirés à la charge réglementaire de 4gr,5. Le n° 1 avec la balle cylindrique pesant 33gr, située, comme à l'ordinaire, contre la poudre; le n° 2 avec la balle située à 0m,02 de la tranche de la bouche; le n° 3 sans balle. Chaque fusil était enveloppé dans une couverture blanche en laine à plusieurs doubles, serrée autour du canon avec une bande de la même laine.

Après avoir marqué la température des canons, on faisait un certain nombre de coups avec chacun d'eux, dans des circonstances autant que possible pareilles.

Ensuite on remplissait chaque canon de mercure dont on connaissait la température; on en fermait la bouche avec un tampon en gutta-percha, traversé par un thermomètre. On marquait la température à l'instant où la hauteur du thermomètre atteignait son maximum.

On a obtenu ainsi les résultats suivants :

	N. 1	N. 2	N. 3
Température du canon avant le tir	14°,2	14°,2	14°,2
Température du canon rempli de mercure après 1 coup	16,7	17,1	16,8
Température du canon avant le tir	14°,2	14°,2	14°,2
Température du canon rempli de mercure après 5 coups	23,1	31,8	26,9
Température du canon avant le tir	18,1	18,2	18,4
Température du canon rempli de mercure après 10 coups	33,4	43,2	38,4
Température du canon avant le tir	13,5	14,1	15,0
Température du canon rempli de mercure après 50 coups	54,0	89,0	79,5

La température du mercure avant de le verser dans les canons a toujours été trouvée égale à la température de ceux-ci avant le tir.

Le poids du canon en acier était { pour le N. 1 = 2k,050 ; pour le N. 2 = 2,064 ; pour le N. 3 = 2,042

Le poids du mercure nécessaire pour remplir le canon était égal à 3k,350.

La chaleur spécifique de l'acier est 0,118.
La chaleur spécifique du mercure 0,033.

De ces données on déduit :	N. 1	N. 2	N. 3
	calories	calories	calories
Quantité de chaleur transmise au canon par 1 coup	0,881	1,027	0,914
» 5 coups	3,137	6,232	4,464
» 10 »	5,392	8,853	7,030
» 50 »	14,274	26,522	22,672
Il en résulte que la quantité moyenne de chaleur, transmise au canon par chaque coup, est dans			
le tir à 1 coup	0,881	1,027	0,914
» 5 coups	0,627	1,246	0,893
» 10 »	0,539	0,885	0,703
» 50 »	0,285	0,530	0,453
L'expérience du tir à 1 coup ayant été répétée donna	1,093	1,169	1,090

Ce résultat, sensiblement plus grand que l'autre, peut être attribué à ce que, pendant cette expérience, la température extérieure ayant été plus élevée, il a dû se perdre moins de chaleur, par le contact de l'air et par rayonnement.

On voit, d'après cela, que, comme nous l'avions annoncé, le tir avec la balle, placée à la bouche du canon, échauffe l'arme plus que le tir sans balle; et que celui-ci l'échauffe plus que le tir avec la balle placée contre la poudre.

Nous ajouterons que la force vive de la balle, en sortant du canon, était égale à 315 kilogrammètres, pour la balle placée contre la poudre; et à 102 kilogrammètres, pour la balle placée à $0^m,02$ de la tranche de la bouche.

La chaleur absorbée par l'arme ne peut pas être négligée. — On voit, en outre, que la chaleur communiquée

à l'arme après chaque coup n'est point, comme on le croit ordinairement, une très-petite partie de la chaleur totale dégagée par la combustion de la poudre. En effet, les échauffements mesurés répondant à une charge de poudre de $0^k,0045$, il en résulte que, toutes choses égales d'ailleurs, 1^k de poudre donnerait, d'après la

	N. 1	N. 2	N. 3
	calories	calories	calories
1re expérience	195,8	228,2	203,1
2me »	242,9	259,8	242,2

résultat égal environ au tiers de la chaleur totale développée par la combustion de 1^k de poudre, chaleur qui est de $619^{cal.},5$, suivant les expériences de MM. Bunsen et Schischkoff (*).

On remarquera que les résultats que nous avons obtenus sont certainement au-dessous de la réalité, puisqu'une partie de la chaleur a dû s'échapper par rayonnement et par le contact de l'air atmosphérique.

Nous pouvons conclure que la chaleur absorbée par les parois de l'arme surpasse, dans le fusil, le tiers de la chaleur totale dégagée par la combustion de la charge de poudre. Dans le canon, cette quantité doit être moindre, parce que les surfaces des enveloppes croissent moins rapidement que les volumes; mais c'est encore une quantité qu'il n'est point permis de négliger.

Exemple numérique. — Pour donner une idée des erreurs

(*) *Annales de Poggendorff*, vol. CII.

auxquelles on s'exposerait en ne tenant point compte de cette perte de chaleur, nous allons prendre un exemple numérique. Mais auparavant nous simplifierons les formules trouvées ci-dessus.

La vitesse u' du recul de l'arme est généralement assez petite par rapport à la vitesse u du projectile, pour qu'on puisse la négliger. Si l'on néglige, en outre, la force vive imprimée aux particules de l'air atmosphérique, ainsi que le travail produit par la pression de l'air sur le projectile, quantités qui sont toujours très-faibles par rapport au travail total de la poudre, on aura simplement

$$\left(1+n^2+\frac{\mu}{3m}\right) m u^2 = 2J H_0 \left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^\beta\right],$$

quand on suppose le canon imperméable à la chaleur ; et

$$\left(1+n^2+\frac{\mu}{3m}\right) m u^2 = 2J (H_0 - Q) \left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^\beta\right],$$

quand on suppose que la chaleur Q est absorbée par la pièce dès l'origine du mouvement.

Pour en venir à l'exemple numérique, on peut admettre que, dans les canons rayés se chargeant par la culasse avec des projectiles à forcement complet, le travail développé par la poudre sur le projectile est, à peu près, de 54.000 kilogrammètres par kilogramme de poudre.

On a, d'après cela

$$\frac{m u^2}{2g\mu} = 54.000.$$

Nos formules deviennent dès lors

$$54.000\left(1+n^2+\frac{\mu}{3m}\right)=\frac{J(H_0-Q)}{g\mu}\left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta}\right],$$

où il suffira de faire

$$Q=0$$

pour avoir le cas d'un canon imperméable à la chaleur. On tire de là

$$\frac{H_0-Q}{g\mu}=\frac{54.000\left(1+n^2+\frac{\mu}{3m}\right)}{J\left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta}\right]}.$$

Prenons le canon rayé de campagne en bronze, du calibre de 7,5 centimètres, de l'artillerie italienne, canon dont l'obus ordinaire a une demi-force vive qui s'éloigne peu de 54.000 hilogrammètres par kilogramme de poudre. On a, dans cette pièce,

$$\frac{\mu}{m}=\frac{0,55}{3,7}=0,1486,$$

$$n=\frac{2\pi.0,0172}{3,5}=0,0309.$$

Par conséquent on trouve

$$1+n^2+\frac{\mu}{3m}=1,059.$$

L'âme a une longueur totale de $1^m,603$; la charge occupe

une longueur de 0m,16. En négligeant, dans le volume de l'âme, les rayures et la différence de diamètre qu'il y a entre la partie rayée et la chambre, on aura

$$\frac{v_0}{v} = \frac{0{,}16}{1{,}603} = 0{,}0998 .$$

En prenant

$$\beta = 0{,}41 ,$$

on trouvera

$$\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta} = 0{,}3887 .$$

Ainsi, en prenant

$$J = 425^{km},$$

on obtiendra

$$\frac{H_0 - Q}{g\mu} = 220 \text{ calories.}$$

Comme $g\mu$ représente le poids de la charge, ces 220 calories exprimeront la chaleur contenue dans un kilogramme de poudre immédiatement après la combustion, moins la chaleur absorbée par l'arme.

MM. Bunsen et Schischkoff ont trouvé, par l'expérience directe, que la chaleur dégagée par un kilogramme de poudre est égale à $619^{cal},5$.

D'après cela, on aura

$$\frac{H_0}{g\mu} = 619{,}5 ;$$

de sorte qu'il viendra

$$\frac{Q}{g\mu} = 399^{cal},5 .$$

Or, nous avons vu plus haut que l'équation

$$\left(1+n^2+\frac{\mu}{3m}\right)mu^2=2J\,(H_0-Q)\left[1-\left(\frac{v_0}{v}\right)^{\beta}\right]$$

conduit à une valeur de u trop faible. Par conséquent la valeur de Q que fournit cette équation, lorsque u et H_0 sont données par l'expérience, doit être trop forte. Nous pouvons en conclure que la chaleur qu'absorbent les parois de l'arme est inférieure à $399^{cal.},5$ par kilogramme de poudre.

La limite supérieure de la chaleur soutirée par les parois de l'arme est notablement plus grande dans les armes à feu portatives que dans les canons. En effet le travail, par chaque kilogramme de poudre, que fournissent les petites armes est moindre, n'arrivant pas à 50.000 kilogrammètres, encore que le rapport du volume total de l'âme au volume occupé par la poudre soit bien plus grand. Pour ces deux raisons, il en résulte une valeur de Q plus grande.

Poudre non brûlée. — Fuite des gaz par le vent et par la lumière. — En évaluant à 54.000 kilogrammètres le travail développé par chaque kilogramme de poudre, contre le projectile, dans les canons, nous avons supposé tacitement que toute la charge était employée contre le projectile; mais en réalité, une partie notable de la charge n'a aucune action sur le projectile. En premier lieu, une partie de la charge reste inactive, parce qu'elle n'est pas encore brûlée à l'instant où le projectile quitte la pièce; en second lieu, une partie de la charge, déjà réduite en gaz, s'échappe par la lumière et par le vent du boulet lorsque ce dernier n'est pas forcé.

Il s'ensuit que, en réduisant à l'unité le travail déve-

loppé par la charge entière, nous avons divisé par un nombre trop grand et que, par conséquent, nous avons estimé trop bas le travail mécanique dont la poudre est capable.

Pour s'en convaincre mieux, il suffit d'examiner le travail développé par des charges de poudre successivement croissantes. Prenons, par exemple, le canon de 12, français, de place. On trouve à la page 922 de l'*Aide-mémoire à l'usage des officiers de l'artillerie*, édition de 1856, les résultats suivants :

Charge	Vitesse initiale
kil.	mèt.
0,5	295
0,575	400
1,0	423
2,0	526
3,0	566.

Le poids du boulet étant égal à 6k,07, on trouve pour le travail développé par 1 kilogr. de poudre, en prenant $g = 9^m,8088$,

Charge	Travail par kilogr. de poudre
kil.	km.
0,5	53864
0,575	56579
1,0	53864
2,0	47884
3,0	33841.

On voit par là qu'en augmentant la charge de 0k,575 à 3 kilogr. le travail développé par 1k de poudre diminue à mesure que la charge augmente, ce qui prouve

qu'une partie de celle-ci n'est pas brûlée lorsque le projectile sort de la pièce. A la vérité, le rapport des espaces occupés par les gaz de la poudre à la fin du phénomène et à l'origine décroît avec la charge; mais cette cause de diminution ne suffit pas à elle seule pour produire, dans la force vive du projectile, une diminution aussi grande que celle qu'on observe, comme on peut s'en assurer par le calcul.

On s'explique le fait contraire qu'au-dessous de la charge du *maximum*, égale à $0^k,875$, le travail croisse avec la charge, en réfléchissant que le boulet reste d'autant plus longtemps dans la pièce que la charge est plus petite, et que la déperdition de chaleur et les fuites, par le vent et par la lumière, doivent augmenter rapidement avec le temps.

Pour apprécier dans le fusil, l'influence du poids du projectile sur le travail développé par l'unité de poids de la charge, on a exécuté l'expérience suivante au Laboratoire Pyrotechnique. Avec le canon de l'ancien fusil lisse d'infanterie (calibre $0^m,0175$, longueur 60 calibres) et la charge de $0^k,0045$, on lança contre le pendule balistique des cylindres en plomb, de diamètre presque égal à celui de l'âme, et de longueurs croissantes. On obtint ainsi les résultats suivants :

Poids des cylindres kil.	Travail développé par 1 kilogr. de poudre km.
0,025	45200
0,050	50100
0,100	52900
0,110	55700
0,150	52700
0,200	43100.

Ainsi, tandis qu'avec l'ancienne charge de $4^k,000$ et la balle sphérique du poids de $0^k,0252$ ayant un vent de $0^m,0012$, le travail de 1^k de poudre s'élevait à peine à 29000^{km}, avec la charge de $0^k,0045$ de poudre et un cylindre pesant $0^k,110$, ayant un vent presque nul, le travail de 1^k de poudre monte jusqu'à 55700, presque au double.

La réaction chimique qui a lieu dans la combustion de la poudre peut varier suivant les circonstances. — Il est possible qu'une résistance plus grande à l'expansion des gaz de la poudre fasse non-seulement augmenter la quantité de poudre brûlée avant la sortie du boulet, mais qu'elle détermine encore une réaction chimique plus complète entre les composants de la poudre, de manière à développer une plus grande quantité de chaleur; ou, en d'autres termes, il est possible que les produits de la décomposition de la poudre varient suivant la pression et la température. Nous voyons, par exemple, que la combustion de la charge de poudre est bien plus parfaite dans le tir à boulet que dans le tir à poudre. Les accidents malheureux occasionnés par le départ spontané de coups de canon, arrivent presque toujours dans le tir à poudre, parce que dans celui-ci la réaction chimique n'étant pas complète, il reste dans l'âme de la pièce des résidus allumés qui, au coup suivant, communiquent le feu à la charge pendant qu'on l'introduit dans la pièce.

DU TIR

DU TIR.

PRÉFACE.

Le mémoire suivant s'adresse aux personnes peu versées dans les mathématiques. Il est divisé en trois parties.

La première partie comprend la théorie du pointage des armes à feu. Tous les auteurs qui ont traité ce sujet admettent implicitement le principe que l'abaissement du projectile au-dessous de la ligne de projection, dans chacun des points de son trajet dans l'espace, est indépendant de l'inclinaison de cette ligne sur l'horizon; mais ils n'en donnent aucune démonstration.

Ce principe, qu'on énonce aussi, en disant que l'angle de projection, rapporté à la ligne qui va de la bouche de l'arme au but, est indépendant de l'élévation de ce but, ce principe, disons-nous, n'est pas cependant rigoureusement

exact. mais il s'approche d'autant plus de la vérité que l'angle de projection est plus petit.

Il en résulte que, pour l'employer en connaissance de cause, il faut savoir étendre la limite des erreurs auxquelles il conduit. C'est ce que nous avons tenté de faire, pour le cas des projectiles sphériques qui n'ont aucun mouvement de rotation, dans une note placée à la fin du mémoire, note que le lecteur étranger aux mathématiques pourra passer.

Il resterait à faire le même travail par rapport aux projectiles oblongs lancés par les armes rayées, pour lesquels on peut admettre en outre que la distance horizontale du projectile au plan de projection, dans chacun des points de son trajet dans l'espace, est à peu près indépendante de l'angle de projection. C'est une lacune à remplir. Pour le moment, on peut considérer ce principe comme un résultat de l'expérience directe.

La deuxième partie de ce mémoire renferme un examen assez étendu des causes des déviations qu'on observe dans le tir des armes à feu, ainsi que des moyens employés, ou proposés, pour combattre ces causes.

Dans la troisième partie, nous examinons quelques-uns des préjugés qui ont cours touchant le tir des armes à feu. C'est un sujet sur lequel nous ne croyons pas qu'on ait écrit avant nous.

A part quelques modifications rendues nécessaires, par l'introduction des armes rayées, le mémoire que nous donnons ici est la traduction du mémoire que nous avons fait paraître en 1857 sous le titre : *Del tiro.*

Turin, mars 1873.

DU TIR.

(DEL TIRO. *Torino*, *Stamperia Reale*, *1857*).

PREMIÈRE PARTIE.

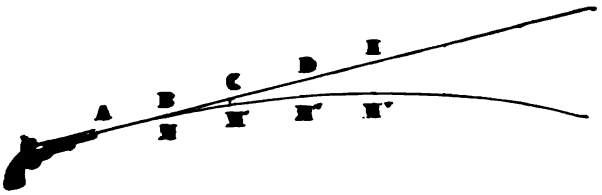
DU POINTAGE.

1. Trajectoire. — Lorsqu'on communique le feu à la charge d'une arme, la poudre, en brûlant, chasse devant elle le projectile qui y est superposé et lui fait prendre un mouvement accéléré dans la direction de l'axe de l'arme.

Si l'arme est rayée, le projectile s'engage dans les cannelures inclinées creusées à l'intérieur du canon, et, tandis qu'il s'avance dans le sens de l'axe, il prend un mouvement de rotation rapide autour de cet axe, mouvement qu'il continue dans l'air.

Dès que le projectile a franchi la bouche A, le soutien de la paroi inférieure de l'âme venant à lui manquer, il commence, en raison de son poids, à s'abaisser au-dessous de la direction AB de l'axe, et il va sans cesse en s'écartant de cette dernière, à mesure qu'il s'avance. Au point B son abaissement est BM; au point C, CM' plus grand que BM, et ainsi de suite.

La ligne *AMM'*... que décrit le projectile se nomme *trajectoire*. Elle touche l'axe *AB* de l'âme à la bouche en



A, et s'abaisse de plus en plus au-dessous de cette ligne prolongée, qui s'appelle *ligne de tir*, à mesure que le projectile s'éloigne de la bouche.

Pendant que le projectile s'avance, il doit se frayer un passage à travers l'air environnant qui lui oppose une résistance considérable et en retarde le mouvement.

Si la résistance de l'air agissait symétriquement autour du centre de gravité du projectile, son effet se bornerait à retarder la marche du projectile. De sorte que ce dernier resterait, pendant tout son trajet, compris dans le plan vertical de la ligne de tir, qu'on appelle *plan de tir*. Cela a lieu dans le tir des anciens projectiles sphériques, lorsqu'ils n'ont aucun mouvement de rotation. Mais, pour les projectiles oblongs, qui ont remplacé partout les projectiles sphériques, la résistance n'est pas symétrique, et dès lors elle force le projectile à sortir du plan de tir.

A peine sorti du canon, par l'effet de la résistance de l'air, qui se trouve appliquée en avant du centre de gravité, la pointe d'un projectile oblong s'éloigne de la trajectoire et commence à tourner autour de celle-ci, dans le même sens que le projectile tourne autour de son axe. Par suite de ce mouvement, le projectile vient se présenter de travers à l'action de l'air, qui le fait dévier du côté vers lequel la pointe est dirigée.

Ainsi le projectile sort du plan de tir et s'en écarte, à mesure qu'il s'avance.

L'écart du projectile de ce plan a reçu le nom de *dérivation*.

La distance entre la bouche de l'arme et le point où le projectile atteint le plan horizontal, passant par cette bouche, s'appelle *portée*.

L'angle que la ligne de tir forme avec la ligne horizontale s'appelle *angle de tir*.

Il est clair que le tir d'une arme à feu quelconque est complétement déterminé dès qu'on connaît la portée et la dérivation qui correspondent à chaque angle de tir.

On conçoit qu'on puisse obtenir expérimentalement des tables donnant, pour les armes de divers calibres, les portées et les dérivations correspondantes aux divers angles de tir. A l'aide de ces tables, on pourra résoudre la question inverse, c'est-à-dire trouver l'angle de tir, étant donnée la portée.

On donne le nom d'*angle de chute* à l'angle que forme avec le plan horizontal la tangente à la trajectoire, au point de chute.

2. Pointage. — Le *pointage* est l'opération qui consiste à diriger une arme à feu de manière à atteindre un but déterminé.

Pour pointer une arme à feu, il faut:

1° Faire passer le plan de tir à une distance du but égale à la dérivation ;

2° Donner à l'axe de l'arme l'élévation nécessaire pour que le projectile atteigne le but.

C'est au moyen de la *hausse* qu'on parvient à résoudre ce double problème.

A la partie supérieure de la culasse et perpendiculairement à l'axe de l'arme, est placée une petite règle graduée, à laquelle on donne le nom de *hausse verticale*, qui peut glisser suivant sa longueur dans une coulisse fixe à la culasse. Perpendiculairement à la règle verticale, et sur sa tête, est appliquée une autre règle horizontale graduée, à laquelle on donne le nom de *hausse horizontale*, qui peut aussi varier de longueur.

Du côté de la bouche de l'arme, est placé un guidon ou mire. La ligne que déterminent l'extrémité de la hausse horizontale et le sommet du guidon, prend le nom de *ligne de mire*.

Cela posé, concevons qu'on fasse partir le coup avec un angle de tir déterminé. On obtiendra une portée et une dérivation déterminées. Imaginons maintenant une ligne droite passant par le guidon et par le point atteint, ou but, que nous supposerons au même niveau que la bouche de l'arme; cette ligne viendra couper en un certain point la hausse horizontale qu'on aura élevée convenablement au moyen de la hausse verticale.

On aura, par là, la hausse verticale et la hausse horizontale correspondantes à une portée et à une dérivation données. De sorte que, quand le but sera placé à cette distance, il suffira de viser par l'extrémité de la hausse ainsi déterminée et par le guidon, et de faire mouvoir l'arme jusqu'à ce que le rayon visuel passe par le point qu'on veut atteindre.

A l'aide de ce système, les deux opérations qui constituent le pointage, c'est-à-dire la détermination de la direction et de l'élévation à donner à l'axe de l'arme, s'exécutent en même temps.

On peut de la sorte trouver expérimentalement la hausse

verticale et la hausse horizontale qui correspondent à diverses distances du but, et se procurer tous les éléments d'une table de tir.

Il est facile de voir que la hausse verticale et la hausse horizontale sont égales à l'abaissement et à la dérivation du projectile au point de chute, relativement à la ligne de tir, réduits dans le rapport de la portée à la longueur de la ligne de mire.

Après avoir donc mesuré sur le terrain la portée et la dérivation, ainsi que l'abaissement vertical du but au-dessous de la ligne de tir, il suffira, pour avoir la hausse horizontale et la hausse verticale qui y correspondent, de diviser la dérivation et l'abaissement du projectile par le nombre exprimant combien de fois la portée contient la longueur de la ligne de mire.

Aux hausses horizontales et verticales, on peut substituer une seule hausse dont le profil s'obtient en réunissant par une ligne continue les extrémités de la hausse horizontale dans ses positions successives. Cette nouvelle hausse sera généralement courbe; mais, pour plus de simplicité, on pourra lui substituer la ligne droite qui s'en approche le plus.

Lorsque le but est plus élevé que la bouche de l'arme, il faut, pour l'atteindre, augmenter l'angle de tir. A la rigueur, pour obtenir l'angle correspondant à chaque hauteur du but, il faudrait trouver expérimentalement, pour chaque distance, les angles successifs qui correspondent aux diverses hauteurs du but; ce qui serait presque impraticable.

Heureusement on peut éviter ce labeur, en admettant le principe *que, pour des angles de tir peu considérables (ne dépassant pas 15° environ), c'est-à-dire que, pour le*

tir habituel des armes à feu, les abaissements au-dessous de la ligne de tir et les dérivations du projectile sont indépendants des angles de tir. Ce principe a toujours été admis dans le tir des projectiles sphériques (*). L'expérience prouve qu'on peut l'étendre au tir des armes rayées lançant des projectiles allongés.

Ce principe étant admis, il en résulte que la hausse et la dérivation, pour atteindre un but déterminé, restent les mêmes, quelle que soit la hauteur de ce dernier au-dessus ou au-dessous de la bouche de l'arme.

Par conséquent le pointage avec la hausse ne change pas, que le but soit, ou ne soit pas au niveau de la bouche de l'arme. C'est un très-grand avantage qu'a ce système de pointage sur le système à l'aide de l'angle de tir.

En effet, dans ce dernier, il faut ajouter à l'angle de tir, ou en retrancher l'angle que fait avec l'horizon la droite menée du centre de la bouche au but, suivant que le but est plus élevé ou moins élevé que la bouche de l'arme. Aussi le pointage avec l'angle de tir n'est-il employé que quand l'angle de tir étant assez grand, la hausse prendrait une très-grande longueur.

Il est bon de remarquer que l'emploi de la hausse équivaut en exactitude à l'emploi, pour mesurer l'angle de tir, d'un arc de cercle dont le rayon serait égal à la longueur de la ligne de mire.

On a, dans toutes les Artilleries, des tables donnant, pour chaque arme, les hausses verticales et horizontales qui correspondent aux diverses portées. Nous donnons ci-après les tables de tir du fusil d'infanterie et du canon de campagne.

(*) Nous en donnons la démonstration dans une Note à la fin de cet écrit.

Table de tir du fusil d'infanterie, modèle 1870.

(Calibre: $10^{mm},35$. Poids de la balle: 20^{gr}; de la charge: 4^{gr}).

Distances	HAUSSES	
	Verticales	Horizontales
mètres	millimètres	millimètres
200	4,60	—
300	8,00	—
400	11,82	—
500	16,06	—
600	20,72	0,10
700	25,80	0,16
800	31,30	0,24
900	37,22	0,36
1000	43,56	0,54

NOTA. La longueur de la ligne de mire est, en moyenne, de $0^{m},773$. On ne tient pas compte, dans la pratique, des hausses horizontales, vu leur petitesse.

Table de tir du canon rayé de campagne, en bronze, de 7 centimètres, se chargeant par la culasse.

(Poids de l'obus oblong: $3^{k},720$. Poids de la charge: $0^{k},550$).

Distances	Hausses vertic.	Angles de chute	Durées du trajet
mètres	millimètres		secondes
200	0	0° 23′	0,6
400	9	0 52	1,2
600	19	1 25	1,8
800	29	2 5	2,4
1000	40	2 53	3,0
1200	51	3 47	3,8
1400	63	4 48	4,6
1600	75	5 52	5,4
1800	87	7 3	6,2
2000	101	8 19	7,0
2200	115	9 42	7,8
2400	131	11 12	8,6
2600	147	12 49	9,5
2800	165	14 31	10,5
3000	184	16 21	11,6
3200	205	18 19	12,8
3400	228	20 26	14,0

NOTA. La longueur de la ligne de mire est de 1^{m}. On n'a pas égard, dans la pratique, aux dérivations qui sont insignifiantes.

DEUXIÈME PARTIE.

DE L'EFFICACITÉ DU TIR.

3. Trajectoire moyenne. — Il semblerait, au premier abord, que chaque fois qu'on tire avec une arme à feu, sans rien changer à la charge et à la direction, on devrait obtenir une même trajectoire. Mais il n'en est pas ainsi. Une foule de causes, dont nous parlerons plus loin, qui se reproduisent irrégulièrement et ont chacune un effet particulier, font que les projectiles décrivent généralement à chaque coup une trajectoire différente.

Les diverses trajectoires, qui répondent à la même charge et à la même direction de l'axe, ne sont pas bien éloignées les unes des autres près de la bouche de l'arme ; mais elles s'écartent de plus en plus à mesure que la distance augmente.

Ces trajectoires forment dans l'espace une gerbe.

En général, plus cette gerbe est resserrée, plus l'arme a de justesse ; au contraire, plus la gerbe est lâche, moins l'arme en a.

Qu'on se figure, au milieu de la gerbe, une trajectoire occupant une position centrale entre toutes les autres. Ce sera la *trajectoire moyenne*.

Il est évident que c'est cette trajectoire moyenne qu'on doit employer pour la fixation des règles de tir de l'arme, car c'est celle qui expose le moins à commettre des erreurs.

L'écart entre le projectile et la trajectoire moyenne prend le nom de *déviation*.

La somme des déviations divisée par leur nombre est ce que l'on nomme *déviation moyenne*.

4. Plus grande portée — Limites des portées utiles. — Supposons qu'une cible, assez grande pour recueillir tous les coups soit transportée successivement à diverses distances ; et qu'un même tireur vise constamment, aussi bien qu'il peut, au centre de la cible, avec la même arme et avec les règles de tir qui conviennent à chaque distance. Il est evident qu'à mesure que la cible s'éloigne :

1° Le tireur doit donner une plus grande élévation à l'arme ;

2° Les projectiles pénètrent moins dans la cible ;

3° Les points touchés, ou *points d'impact*, des divers coups tirés à la même distance, sont plus écartés.

Si l'on continue à éloigner la cible, on arrivera à une distance au delà de laquelle la cible ne pourra plus être atteinte, quelle qu'en soit la largeur et quelle que soit l'élevation de l'arme.

Lorsqu'on est arrivé à l'élévation qui répond à cette distance, si l'on continue à faire croître l'élévation, la portée au lieu de croître, diminue de plus en plus à mesure que l'élévation est plus grande.

Il existe donc, pour chaque arme, une distance au delà de laquelle le projectile ne peut plus arriver. Cette distance se nomme la *plus grande portée*.

En général, avant d'arriver à cette distance, il en est une autre où le projectile cesse d'avoir une pénétration suffisante. Ainsi, il existe, pour chaque arme, une seconde distance, en général moindre que la première, au delà de laquelle le projectile ne conserve pas une pénétration suffisante pour l'objet qu'on se propose.

Relativement à la distribution des points d'impact autour du point moyen, si l'on compte ceux qui sont compris dans une surface donnée, on verra, qu'arrivés à une certaine distance, le nombre en est assez faible. D'où l'on infère la nécessité de considérer une troisième distance, moindre, en général, que la seconde, au delà de laquelle le tir devient trop incertain. C'est *la limite des portées utiles*.

Prenons comme exemple le fusil d'infanterie, modèle 1870 (système Vetterli). A mesure qu'on en augmente l'élévation, on obtient une portée plus longue: avec l'angle de $1^{\circ}\frac{1}{2}$ environ, on a une portée de 600^{m} et avec une plus grande élévation, on peut lancer la balle jusqu'au delà de 2700^{m}. Mais à cette distance la balle ne conserve plus une vitesse suffisante pour produire des blessures graves; et au delà de 1500^{m} les coups sont très-incertains. Aussi n'est-ce que jusqu'à la distance de 1000^{m} que le feu du fusil est réellement efficace; et la bonne portée de l'arme est encore moindre.

On conclut de tout ce qui précède qu'il existe, pour chaque arme à feu, trois distances remarquables, savoir:

1° La plus grande portée;

2° La limite des distances eu égard à la pénétration nécessaire;

3° La limite des portées utiles eu égard à l'incertitude du tir.

De ces trois distances, la dernière est la plus importante à connaître, parce que c'est ordinairement la plus petite.

Il est bon de remarquer que le nombre des coups qui atteignent une cible de dimensions données, est variable suivant les circonstances dans lesquelles se trouve placé le tireur. Les résultats qu'on obtient dans un cours d'expériences sont bien plus avantageux que ceux qu'on constate dans les écoles de tir. Les effets du tir sont encore moindres dans les feux des troupes, surtout en face de l'ennemi. Lorsqu'il faut, comme il arrive dans ce dernier cas, évaluer la distance à la vue simple, on est exposé à commettre des erreurs graves qui diminuent grandement l'efficacité du tir.

5. Causes des déviations. — Les causes qui font changer presque à chaque coup la route que suit le projectile se divisent en deux catégories, savoir :

Les causes *fortuites* ou *irrégulières;*

Les causes *permanentes* ou *régulières.*

Les causes fortuites agissent indifféremment, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre.

Les causes permanentes agissent toujours dans le même sens.

Les altérations que produisent les causes fortuites ou accidentelles, se nomment *déviations accidentelles;* les altérations que produisent les causes permanentes, se nomment *déviations permanentes.*

Nous allons éclaircir par un exemple cette distinction entre les deux espèces de causes qui influent sur le tir.

Supposons qu'on tire une arme à feu contre le centre d'une cible assez grande pour recueillir tous les coups;

et qu'on mesure la distance horizontale de chaque point touché, ou d'*impact*, au centre de la cible. Après un grand nombre de coups, si l'on retranche la somme des écarts à gauche de la somme des écarts à droite, la différence divisée par le nombre des coups sera nulle, ou du moins négligeable, ou aura une certaine valeur.

Dans le premier cas, où il s'est établi à la longue une espèce d'équilibre entre les écarts à droite et les écarts à gauche, il est clair que les causes qui influent sur le tir sont fortuites ; car ces dernières s'exerçant indifféremment tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, elles doivent à la longue se compenser entre elles et s'entre-détruire.

Au contraire, s'il ne s'établit point une compensation entre les écarts à droite et les écarts à gauche, il faut en conclure qu'il existe une cause permanente, influant sur le tir, ou même plusieurs causes permanentes. L'écart moyen est la déviation permanente due à la cause permanente, ou aux causes permanentes.

Les mêmes considérations s'appliquent aux écarts verticaux, ou mesurés relativement à une ligne horizontale passant par le centre de la cible.

Lorsqu'on connaît, d'après l'expérience, la déviation permanente, il est facile de corriger le tir de manière à pouvoir atteindre le centre de la cible, ou, pour mieux dire, de manière que les points d'impact viennent se grouper régulièrement autour du centre de la cible. Il suffit pour cela de pointer plus à gauche, ou plus à droite et plus bas, ou plus haut des quantités indiquées par les déviations permanentes horizontale et verticale trouvées expérimentalement.

S'il n'existait que des causes permanentes sans aucun

mélange de causes fortuites, elles ne produiraient que des déviations constantes pour chaque distance. Le tir aurait alors une très-grande précision ; mais, par suite des causes fortuites, chaque coup dévie de la trajectoire moyenne tantôt d'un côté, tantôt d'un autre.

Les causes fortuites peuvent renfermer une partie permanente. Par exemple, la faillibilité du coup d'œil du pointeur est une cause fortuite d'erreur qui pourra renfermer une partie permanente, si, comme il arrive souvent, le pointeur a une tendance à se tromper d'un côté plutôt que de l'autre.

En outre, il y a des causes qui peuvent être fortuites dans certaines circonstances et permanentes dans d'autres. Par exemple, la position défectueuse de la ligne de mire est une cause fortuite, si l'on a égard à tous les fusils d'un bataillon; parce que la ligne de mire peut être à droite dans l'un, à gauche dans l'autre; plus inclinée dans l'un, moins inclinée dans l'autre. Au contraire, si l'on ne considère qu'un seul fusil, la position défectueuse de la ligne de mire est une cause permanente, parce que le projectile déviera toujours du même côté par suite de ce défaut.

Conformément à la distinction que nous venons d'établir, les causes principales de déviation dans le tir des armes à feu sont les suivantes:

CAUSES FORTUITES:

Variation dans la direction du projectile au départ,
Variation dans la vitesse initiale,
Variation dans la résistance de l'air,
Rotation irrégulière du projectile.

CAUSES PERMANENTES :

Position défectueuse de la ligne de mire,
Vent,
Rotation de la terre,
Rotation régulière du projectile.

Causes fortuites.

6. Variations dans la direction du projectile au départ. — Il est évident qu'une variation dans la direction que prend le projectile à sa sortie de l'arme, écarte le projectile de la ligne qu'il aurait suivie, et cela d'autant plus que la distance est plus grande. Les variations dans la direction initiale proviennent :

1° D'une erreur dans le coup d'œil du pointeur;

2° De la mauvaise position que le pointeur peut donner à son arme;

3° De l'évaluation erronée de la distance du but;

4° Du mouvement de l'arme au moment du tir;

5° De ce que le projectile ne sort point dans la direction de l'axe de l'arme.

Nous allons passer en revue ces causes diverses.

1° L'opération de placer sur la même ligne droite trois points (les deux mires et le but) est si simple, que, pour peu qu'on y fasse attention, l'erreur provenant de cette cause doit être très-petite.

2° Lorsque le tireur penche son arme à droite ou à gauche, la hausse et le sommet du guidon sortent du plan vertical qui les contenait; mais d'une manière inégale, de manière que la ligne de mire ne sera point parallèle à ce

plan, mais le coupera quelque part. Par conséquent, la trajectoire, qui est déterminée toujours par la direction de l'axe de l'arme, n'aura pas, par rapport à la ligne de mire, la position qu'elle devrait avoir, et le projectile portera du côté où incline l'arme.

En outre, la portée sera diminuée, car, si la hausse est inclinée à droite ou à gauche, sa hauteur verticale sera moindre que dans la position perpendiculaire: donc l'élévation de l'arme sera moindre qu'elle n'aurait dû l'être.

Il est bon de remarquer que, pour les bouches à feu, cette cause est permanente; aussi en parlerons-nous plus longuement en son lieu.

C'est une erreur commune de croire que les irrégularités du tir proviennent principalement des deux causes ci-dessus, qui dépendent de l'habileté du tireur. Il suffit de comparer les déviations observées directement aux erreurs de pointage qui les auraient produites, pour se convaincre que ces erreurs n'entrent que pour très-peu dans les causes d'irrégularité du tir. Par exemple, il résulte de l'expérience directe que la déviation latérale moyenne du canon rayé de campagne de 7, en bronze, à 900^{m} est de 0^{m},55. Une telle déviation ne pourrait être produite par le pointage que, si, au lieu de faire passer la ligne de mire par la mire, on la faisait passer à 0^{mm},6 à droite ou à gauche. Au reste, une preuve incontestable que les déviations latérales ne dépendent pas seulement des erreurs dans la direction initiale du projectile, nous l'avons dans le fait que les déviations croissent dans une proportion plus forte que les distances. La déviation à 900^{m} étant de 0^{m},55, ne devrait être à 2400^{m} que de 1^{m},22; elle est au contraire de 1^{m},39.

3° Les règles de tir pour telle ou telle distance ne s'appliquent exactement qu'à la distance indiquée. Si l'on

se trompe dans l'appréciation de la distance du but, on donne à l'arme une élévation qui ne convient pas à la vraie distance du but, et par suite le projectile porte plus loin ou plus près que le but.

Si le projectile suivait une ligne droite dans son trajet, il atteindrait la cible toujours à la même hauteur quelle qu'en fût la distance; mais, en raison de la courbure de la trajectoire, le projectile atteint la cible en un point plus haut ou plus bas que le centre, suivant que la cible se trouve à une distance plus petite ou plus grande que la distance qui convient à l'angle de tir.

On conçoit donc de quelle importance est, dans le tir, la juste appréciation des distances, surtout pour les grandes distances, où une certaine erreur dans l'élévation peut porter le projectile bien en avant ou bien en arrière du but.

Pour faire ressortir la grande importance pratique de la cause de déviation dont nous parlons, supposons qu'on tire avec le fusil d'infanterie (modèle 1870) contre une cible placée à 800 mètres. Si l'on compare entre eux les deux abaissements du projectile au-dessous de l'axe de l'arme à 700^{m} et à 800^{m}, qui sont respectivement 23^{m},33 et 32^{m},50, on voit que, dans le trajet de 700^{m} à 800^{m}, le projectile s'est abaissé de 9^{m},17. Il en résulte que, si l'on se trompe de 100^{m} sur la distance de 800^{m}, on manquera un objet à toucher, haut de 9^{m},17. Une erreur de 25^{m} correspond à une erreur verticale de 2^{m},29; de sorte que si l'on se trompait de 25^{m}, dans l'appréciation de la distance de 800^{m}, chose très-facile, on manquerait un cavalier. Une simple erreur de 18^{m} ferait manquer un fantassin. Or, est-il probable qu'on juge à la vue une distance de 800^{m} sans commettre une erreur plus grande que 18 mètres?

A la distance de 1000^{m}, une erreur de 100^{m} sur la distance

horizontale produit une erreur correspondante de 13m,86 en hauteur. Ainsi, à cette distance, il suffit d'une erreur de 12m sur la distance, pour faire manquer un fantassin.

Les erreurs provenant de l'appréciation inexacte de la distance du but qu'on veut atteindre sont d'autant plus grandes que le tir a plus de courbure ; c'est-à-dire que la charge est plus petite comparée au poids du projectile. C'est par là que péchaient les premières armes rayées qu'on a adoptées. Comme on avait voulu conserver l'ancien calibre des armes lisses, on eut des projectiles très-lourds, et par suite, afin de ne pas avoir des reculs insupportables avec le fusil, et des résistances insuffisantes dans les bouches à feu, on employa des charges très-faibles donnant des trajectoires très-courbes. Maintenant on a diminué les calibres dans les armes destinées à agir en campagne. Autrefois le calibre des fusils variait entre 15 et 18 millimètres; aujourd'hui il est compris entre 10 et 12 millimètres. De même le calibre des canons de campagne, qui variait entre 90 et 120 millimètres, a été porté de 75 à 100 millimètres. On a pu de la sorte augmenter les charges dans le but d'obtenir des trajectoires plus tendues. Tandis que dans les premiers fusils rayés la charge variait entre $\frac{1}{6}$ et $\frac{1}{10}$ du poids de la balle, maintenant elle s'approche de $\frac{1}{5}$, de sorte que la vitesse initiale surpasse 400m. On a de même augmenté la charge des bouches à feu et on en est venu à la charge de $\frac{1}{5}$, charge qui imprime au projectile une vitesse initiale d'environ 450m dans les bouches à feu bien construites se chargeant par la culasse.

Il arrive souvent qu'une arme, qui a donné de très-bons résultats dans les polygones où les distances sont exactement connues, perd beaucoup de sa justesse dans un tir où les distances sont estimées à la vue. Cette différence

provient de ce que le tir de cette arme étant très-courbe, il suffit d'une petite erreur sur la distance pour en produire une grande en hauteur.

Il importe de faire une distinction entre une arme de tir à la cible et une arme de guerre; celle-là peut avoir une grande précision, même avec une trajectoire courbe; celle-ci ne peut donner de bons résultats que si la trajectoire en est tendue.

4° Les mouvements de l'arme ont une influence sur la direction initiale du projectile: influence assez petite parce que la vitesse de ces mouvements est assez faible en comparaison de celle du projectile. Cependant les expériences révèlent l'existence de cette cause de déviation, surtout dans les armes portatives.

Dans ces armes, l'effort qu'on fait sur la gâchette pour faire partir le coup, tend à faire baisser l'arme. La grandeur de la déviation dépend de la plus ou moins grande dureté du ressort, et de l'habileté du tireur. De sorte que cette déviation ne peut pas être sujette à évaluation.

Le mouvement de recul d'une arme tirée à l'épaule ne se fait point dans la direction de l'axe du canon. Par l'effet de la *pente* (inclinaison de la monture, en arrière du canon, par rapport à l'axe) l'arme, appuyée contre l'épaule du tireur, ne tend pas seulement à reculer, mais encore à pivoter autour de son point d'appui. Ainsi, l'effet du recul est de soulever l'arme et de faire tourner le tireur sur lui-même. La déviation produite par ces deux mouvements est à la fois verticale en haut et horizontale à droite. Elle est d'autant plus forte que le poids de la balle et de la charge est plus grand; mais elle est toujours assez petite, parce que, comme nous l'avons déjà dit, la vitesse du recul, comparée à la vitesse de la balle, est très-petite.

Outre le mouvement de recul, l'explosion de la charge

[illegible] imprime au canon un mouvement vibratoire qui a pour effet d'altérer la direction de la balle à sa sortie du canon. Mais ces effets produits sont insensibles à côté de ceux qui proviennent des autres causes d'irrégularité du tir.

2° Le vent du projectile, c'est-à-dire la différence entre le diamètre du canon et celui du projectile, entraîne de fortes déviations, surtout avec les anciennes armes lisses.

Dans les bouches à feu lisses, au bout d'un certain nombre de coups, on aperçoit une dépression du métal à l'emplacement du projectile, qui est due à la pression que les gaz exercent sur le projectile en s'échappant par l'issue du vent. A cause de cette dépression qu'on nomme *logement*, le projectile, au lieu de suivre la direction de l'axe du canon, dévie en haut.

Si le canon est assez long, le projectile vient choquer la paroi supérieure qui le renvoie en bas, d'où il est rejeté en haut et ainsi de suite; de sorte que le projectile, au lieu de suivre l'axe du canon, s'avance par bonds jusqu'à la bouche d'où il sort en suivant la direction du dernier bond.

Les dépressions que produisent les chocs successifs du projectile s'appellent *battements*. C'est principalement par ces dégradations que les canons à parois lisses sont mis hors de service.

L'expérience a démontré que, en général, dans les bouches à feu, le projectile sort sous un angle plus grand que l'angle formé par l'axe du canon. Le relèvement est en moyenne de $3' \frac{1}{2}$, avec les canons lisses de siége en très-bon état, et de $10' \frac{1}{2}$, avec les obusiers lisses de siége et de campagne. Les déviations produites par ce relèvement sont d'un décimètre par chaque centaine de mètres de distance avec les canons, et de 3 décimètres par chaque centaine de mètres avec les obusiers.

Cette constance du relèvement du projectile entre, comme une partie permanente, dans la cause fortuite de variation de la direction initiale du projectile.

Dans les armes à balle forcée, le vent étant supprimé, la cause de déviation, dont nous avons parlé jusqu'ici, n'existe plus. Dans les canons rayés se chargeant par la bouche avec des projectiles munis d'ailettes, un certain ballottement peut encore avoir lieu, et le projectile peut ne pas sortir dans la direction exacte de l'axe du canon. On a remarqué qu'avec les nouvelles armes rayées un relèvement de l'angle de départ existe encore, même dans les canons à balle forcée; mais qu'il est bien moindre que dans les armes lisses. Peut-être ce relèvement provient-il des mouvements de l'arme par suite du recul. Dans ce cas, la cause de déviation rentrerait dans la précédente.

7. Variations dans la vitesse initiale. — La vitesse initiale communiquée au projectile à chaque coup n'est pas constante. De petites différences inévitables dans le poids de la charge, dans la nature de la poudre, dans son état hygrométrique, dans le plus ou moins de poussier qu'elle renferme, dans sa manière de brûler, etc. font varier la vitesse initiale à chaque coup.

Il en est de même des petites différences dans le poids de la balle; dans les résidus laissés par la poudre, dans l'échauffement de l'arme, etc.

Les variations dans la vitesse du projectile produisent des variations correspondantes dans la trajectoire. Une variation de $\frac{1}{80}$ dans la vitesse initiale, qui peut avoir lieu d'un coup à l'autre dans les armes de guerre, occasionne une variation correspondante, dans l'abaissement de la trajectoire au-dessous de l'axe, de $\frac{1}{40}$ environ. Ainsi la

déviation verticale due à cette variation sera de 0m,26 pour le fusil d'infanterie à 500m, et de 1m pour le canon de 7c de campagne à 1000m.

8. **Variations dans la résistance de l'air.** — Tout changement dans la résistance de l'air fait varier la forme de la trajectoire.

Or la résistance que l'air oppose au projectile est en raison directe de la densité de l'air, et de l'aire de la section du projectile et en raison inverse du poids du projectile.

La densité de l'air dépend de la température, de l'humidité qu'elle renferme et de la hauteur du baromètre. Donc si quelques-unes de ces circonstances atmosphériques viennent à varier, il se produira un changement dans la forme de la trajectoire.

La densité de l'air est une cause permanente de déviation, si l'on ne considère que le tir exécuté dans un certain temps dans lequel les circonstances atmosphériques n'ont point changé; au contraire, la densité devient une cause fortuite pour des coups faits dans des circonstances atmosphériques diverses.

Les variations provenant de l'augmentation ou de la diminution de la densité de l'air sont négligeables dans le tir des armes portatives. Elles sont plus considérables dans le tir des bouches à feu et ne peuvent pas toujours être négligées. Avec le canon de campagne de 7 centimètres, l'abaissement du projectile à 1900m est augmenté de 1m,15 par une augmentation de $\frac{1}{50}$ de la résistance, qui correspond à un abaissement de température de $5° \frac{1}{2}$, ou à un accroissement de 0m,015 de la hauteur du baromètre.

Une variation de $\frac{1}{10}$ dans la densité, qui répond à une

variation de 15° de température et de 0^{m},03 dans la hauteur du baromètre, variation qui peut avoir lieu d'une saison à l'autre, produit sur l'obus de 7 centimètres une augmentation dans l'abaissement de 0^{m},95 à 1000^{m}.

Pour ce qui concerne les variations des dimensions et du poids du projectile, elles sont insignifiantes avec les nouveaux projectiles oblongs, les tolérances accordées pour leur réception étant généralement fort petites. Nous ferons observer qu'une différence de poids du projectile produit deux effets contraires. Par exemple, une augmentation de poids produit une diminution de vitesse initiale, en vertu de laquelle le projectile se trouve d'abord au-dessous de la trajectoire moyenne; mais à cause de son poids plus grand, l'action de l'air étant proportionnellement plus petite, il finit par couper la trajectoire moyenne, et passer au-dessus.

9. Rotation irrégulière du projectile. — C'est la cause principale des irrégularités du tir des anciens projectiles sphériques. Lorsque le mouvement de translation d'un projectile est accompagné d'un mouvement de rotation, il se développe, de la part de l'air qui s'oppose au mouvement, des pressions qui ne sont point dirigées exactement en sens opposé au mouvement de translation, et qui font dévier le projectile de la direction qu'il aurait suivie sans le mouvement de rotation.

L'expérience a démontré que la déviation, due au mouvement de rotation, a toujours lieu du côté vers lequel se meut le point antérieur du projectile sphérique.

Lorsque le projectile peut recevoir à chaque coup une rotation différente, il est jeté tantôt à droite, tantôt à gauche, et dévié tantôt en bas, tantôt en haut.

Le mouvement de rotation peut être engendré par les

battements, par le manque d'homogénéité et par un défaut de symétrie du projectile.

Au moment où un projectile choque la paroi de l'âme, les points de sa surface qui viennent en contact avec la paroi, restent en arrière, tandis que les autres continuent à avancer; il en résulte qu'il prend un mouvement de rotation.

Les battements des projectiles sphériques produisent quelquefois des déviations qui semblent extraordinaires. Par exemple, si le dernier battement a lieu sur la paroi droite, le projectile est jeté vers la gauche de la ligne de tir qu'il aurait dû suivre, mais en même temps il reçoit un mouvement de rotation, par suite duquel le point antérieur se mouvra vers la droite. En vertu de la première déviation de la direction au départ, le projectile doit donc se porter à gauche, et en vertu de la rotation il doit se porter à droite. De sorte que le projectile qui aura commencé par s'éloigner à gauche de la ligne de tir, pourra revenir vers cette ligne et, après l'avoir coupée, se porter vers la droite.

Les *sabots* qu'on fixe aux projectiles sphériques s'opposent jusqu'à un certain point à ces mouvements de rotation irrégulière, qui en rendent le tir incertain, et empêchent en partie les battements qui occasionnent la destruction des bouches à feu.

Les *bouchons* qu'on place entre la charge et le boulet ont un but analogue. En faisant varier la longueur des bouchons, on déplace le point d'appui du boulet et l'on retarde ainsi la formation du *logement*.

Le principal avantage des bouches à feu en métaux plus durs que le bronze, tel que la fonte, l'acier, etc. consiste en ce que le *logement* s'y formant plus difficilement, on

obtient une plus grande justesse de tir, même après un grand nombre de coups, ainsi qu'une plus longue durée du canon.

Les défauts d'homogénéité, les vides produits par suite du mode de fabrication des projectiles sphériques, sont cause que le centre de gravité ne se trouve point au centre de la sphère. Dans ce cas, si le centre de gravité se trouve en dehors de la ligne suivant laquelle agit la poudre, le projectile reçoit au départ une rotation autour de ce centre, attendu que le centre de figure est entraîné plus rapidement que le centre de gravité. De manière que, si le centre de gravité est à droite du centre de figure, la déviation a lieu à droite; si le centre de gravité est à gauche, la déviation a lieu à gauche; et ainsi de suite.

Un projectile sphérique dont le centre de gravité ne coïncide pas avec le centre de figure, acquiert non seulement un mouvement de rotation dans l'intérieur de l'âme par l'action de la poudre, mais il en reçoit encore un autre, dans son trajet dans l'air, par suite de la résistance de ce milieu qui s'exerce en sens contraire de la translation. En effet, la résistance de l'air, passant par le centre de figure, doit imprimer au projectile une rotation autour du centre de gravité toutes les fois que celui-ci se trouve hors de la ligne suivant laquelle s'exerce la résistance.

Enfin, si le projectile n'est pas symétrique par rapport à la direction de son mouvement, la résistance de l'air n'agit pas symétriquement autour de cette ligne et produit un mouvement de rotation. Les défauts de symétrie peuvent préexister dans le projectile, ou provenir d'une déformation occasionnée par le chargement, par les frottements, par les chocs contre les parois de l'âme.

Toutes ces causes de rotations irrégulières qui produisent

des déviations très-considérables dans tous les sens, surtout aux grandes distances, n'existent plus avec les nouvelles armes rayées.

Dans les armes à projectile forcé, le vent est supprimé, et, par suite, les causes de déviations qui en sont la conséquence se trouvent annulées.

Dans les armes où le projectile est garni d'ailettes s'engageant dans les rayures de l'âme, le vent n'est pas complétement supprimé, mais les effets pernicieux en sont bien diminués, par la forme oblongue du projectile et par l'assujettissement que produisent sur lui les rayures.

Causes permanentes.

10. Position défectueuse de la ligne de mire. — Les erreurs provenant de la position défectueuse de la ligne de mire croissent évidemment en raison des distances. Si, par exemple, dans le fusil d'infanterie, le sommet du guidon se trouve éloigné de $0^m,001$ de sa position normale, la ligne de mire défectueuse s'écarte de la ligne de mire exacte de $\frac{1}{773}$ de la distance, dans chacun de ses points, parce que la longueur de la ligne de mire est en moyenne de $0^m,773$. Ainsi, si le guidon est à droite de $0^m,001$ à 1000^m la balle portera à droite de $1^m,3$ à peu près.

On évite les erreurs que produit une ligne de mire défectueuse soit en corrigeant cette ligne, soit en ayant la précaution de viser sur un point placé à la distance convenable du but.

La ligne de mire peut avoir été placée exactement sur l'arme, et cependant on peut commettre une erreur constante dans le pointage. Cela a lieu, comme nous l'avons indiqué

plus haut, lorsque cette ligne n'est point parallèle au plan de tir.

Si les deux roues de l'affût d'une bouche à feu ne sont pas au même niveau, l'axe des tourillons se trouve incliné d'un côté, et le coup porte du côté de la roue la plus basse et plus bas que le but. Par conséquent, pour corriger cette erreur, il faut viser du côté de la roue la plus élevée, et plus haut que le but.

Pour reconnaître le degré d'importance des erreurs produites par cette cause, nous allons donner un exemple particulier: avec le canon rayé de campagne de 7ᶜ, à la distance de 1000ᵐ l'erreur horizontale est de 2ᵐ,94 par chaque décimètre de différence de niveau des roues de l'affût. A la même distance l'erreur verticale n'est que de 0ᵐ,11 par décimètre de différence de niveau.

A la distance de 2000ᵐ, l'erreur horizontale est de 14ᵐ,85, l'erreur verticale de 0ᵐ,54, dans les mêmes circonstances.

On voit par là qu'on peut négliger la correction verticale. Bien que la correction horizontale soit plus considérable, comme sur le champ de bataille les objets à frapper ont toujours une certaine étendue, on peut ordinairement omettre d'en tenir compte.

Le soleil est quelquefois la cause qu'on se trompe sur la véritable place des points qui déterminent la ligne de mire. Lorsque le soleil est à droite, la partie droite du guidon est éclairée, tandis que la partie gauche est dans l'ombre; il se forme alors sur la droite du guidon un point brillant qui porte le tireur à juger le milieu du guidon plus rapproché de la droite qu'il ne l'est en réalité. Un effet inverse se produira sur le cran de mire de la hausse: la partie droite du cran de mire est dans l'ombre, et la partie gauche est éclairée; le tireur est donc porté à faire passer

le rayon visuel par un point situé sur la gauche du milieu du cran. La conséquence de cette double illusion sera de faire diriger sur le but une ligne de mire passant par le côté gauche du cran de mire, et par le côté droit du guidon; c'est-à-dire par une ligne de mire qui diverge à droite du plan de tir. La balle ira donc frapper sur la gauche du but.

On remédie à cette cause d'erreur en visant un peu du côté où luit le soleil.

11. Vent. — L'impulsion continue du vent contre la surface du projectile doit produire des effets d'autant plus grands que la surface que le projectile offre à l'action du vent est plus considérable, et que la durée du trajet est plus grande. C'est pourquoi le vent a peu d'influence sur les projectiles sphériques lancés presque horizontalement; mais il en a une assez considérable sur les projectiles oblongs et sur les bombes.

La déviation latérale due au vent est nulle lorsque le vent a la même direction que le projectile, et croît d'autant plus que la direction du vent se rapproche de la perpendiculaire. La déviation en portée, au contraire, est un maximum lorsque la direction du vent coïncide avec celle du projectile, et diminue, à mesure que l'angle croît, jusqu'à devenir nulle pour l'angle droit. Cette dernière déviation est tout à fait négligeable en pratique.

On calcule que, pour une vitesse du vent de 5^m, vitesse d'un vent assez fort, une bombe de 27 centimètres, lancée sous l'angle de 45^o, à la distance de 1200^m, éprouve une déviation de $1^m,36$, dans la direction du vent. Une vitesse double du vent produirait une déviation double.

L'influence du vent est très-sensible sur les projectiles

oblongs, surtout aux grandes distances et dans le tir courbe. Cela tient à la grande surface qu'ils offrent à l'action du vent et à la longue durée de la trajectoire.

12. Rotation de la terre. — Le mouvement diurne de la terre exerce une influence sur le mouvement des projectiles. Les effets qu'il produit sont d'abord des accroissements ou des décroissements de la portée, selon la direction du plan de tir. Il fait, en outre, sortir le projectile du plan de tir; ce qui donne lieu à une déviation latérale, dont la valeur se compose de deux parties distinctes. L'une de ces déviations partielles est indépendante de la direction du plan de tir; elle a toujours lieu à droite du tireur; à notre latitude, on peut la considérer comme étant l'effet principal de la rotation du globe.

Les déviations provenant du mouvement de la terre sont négligeables dans les tirs exécutés avec des angles de projection très-petits. De sorte qu'il est inutile d'en tenir compte dans la pratique. Cependant elles peuvent être sensibles dans le tir des mortiers et des bouches à feu rayées à grande distance. Par exemple, une bombe de 32 centimètres, lancée à 4000^{m}, sous l'angle de 45°, dévie d'environ 7^{m} à droite. L'obus du canon rayé, en fonte, de 16 centimètres, lancé à 5000^{m}, sous l'angle de 24°, dévie d'environ 6^{m} à droite, par l'effet de la rotation de la terre.

Ces nombres se rapportent à la latitude de 45°; ils varient avec la latitude du lieu du tir: à l'équateur, et lorsque le tir a lieu dans son plan, la déviation horizontale s'évanouit, tandis que les accroissements ou les décroissements de la portée atteignent leur maximum; dans les hautes latitudes, au contraire, la déviation latérale approche de son

maximum et les variations de portée diminuent ; au pôle, la déviation horizontale, la même pour le tir dans tous les plans verticaux, surpasserait d'une moitié environ celle qui a lieu dans notre région. Partout, les accroissements de la portée sont nuls, quand on tire dans le plan du méridien (*).

13. Rotation régulière du projectile. — De même que, parmi les causes fortuites, la rotation irrégulière du projectile est la plus importante, de même, parmi les causes permanentes, c'est la rotation régulière, c'est-à-dire cette rotation qui, à chaque coup, est toujours la même, qui est la plus importante.

On a employé jusqu'ici deux méthodes pour imprimer au projectile une rotation régulière. Dans l'une, on obtient le mouvement de rotation en donnant au projectile une excentricité artificielle et en plaçant, dans l'âme de l'arme, son centre de gravité constamment de la même manière relativement au centre de figure; dans l'autre, on obtient la rotation en forçant le projectile à suivre les rayures en hélice tracées dans les parois de l'âme.

Afin de donner une idée des effets que produisent les rotations qu'on obtient par ces deux méthodes, nous allons rapporter quelques exemples.

En premier lieu, pour ce qui regarde les projectiles excentriques, voici quelques résultats obtenus par l'artillerie française (**).

(*) Voyez : Tome 1 — *Des effets de la rotation de la terre sur le mouvement des projectiles.*

(**) Expériences faites à Metz en 1839.

Tableau des portées comparatives d'obus ordinaires et d'obus excentriques de $0^m,22$,

en plaçant alternativement le centre de gravité de ces derniers au-dessous ou au-dessus du centre de figure.

BOUCHES à feu	POIDS des charges de POUDRE	POIDS des obus	PORTÉE DES OBUS		
			ordinaires	excentriques, le centre de gravité	
				EN BAS	EN HAUT
	kilog.	kilog.	mètres	mètres	mètres
De siége	1,500	26,6	708	»	»
		29,9	»	518	950
		27,9	»	548	941
De côte	1,500	26,6	869	»	»
		29,9	»	712	1163
		27,9	»	731	1009
De côte	3,000	26,6	1170	»	»
		29,9	»	1072	1557
		27,9	»	1117	1320

On voit, par ce tableau, qu'en plaçant le centre de gravité en haut, les portées sont constamment plus longues qu'avec les obus concentriques; par conséquent, l'effet du mouvement de bas en haut du point antérieur est d'augmenter la portée; il y a un effet inverse lorsque le centre de gravité a été placé en bas.

Quant à la déviation particulière aux projectiles oblongs de forme ogivale, lancés par les armes rayées, qu'on distingue, comme nous l'avons dit plus haut, par le nom de

dérivation, nous citerons comme exemple le tir du canon rayé de 0^{m},16, en fonte, de l'artillerie italienne.

Tableau des dérivations de l'obus de 0^{m},16, pesant 39^{k},6, tiré avec le canon rayé, à la charge de 2^{k},200.

Distances .	mètres	500	1000	1500	2000	2500
Dérivations à gauche	»	0,6	2,6	7,2	14,2	25

Distances .	mètres	3000	3500	4000	4500	5000
Dérivations à gauche	»	42	63	93	135	191

On voit, par ce tableau, que les dérivations croissent plus rapidement que les distances; par conséquent, la projection horizontale de la trajectoire est une courbe qui tourne sa convexité vers la ligne de tir.

Les projectiles sphériques libres, lancés par les armes lisses, sont exposés à une cause permanente de rotation, à la vérité assez faible, qu'il est bon de mentionner.

Lorsque les gaz qui se dégagent de la poudre commencent à agir, ceux qui s'écoulent par le vent pressent le projectile contre la paroi inférieure de l'âme. Il en résulte un frottement qui fait prendre au projectile, poussé en avant par les gaz, un mouvement de rotation tel que le point antérieur se meut de haut en bas. Ce mouvement de rotation est cause d'une déviation vers le bas.

Nous allons maintenant passer à une question de la plus grande importance relativement au mouvement de rotation.

Afin que la rotation soit véritablement une cause permanente, il faut qu'elle soit *stable,* c'est-à-dire, il faut qu'elle continue constamment autour du même axe; et que, s'il survient quelque cause perturbatrice, le nouvel axe de rotation qui en résulte ne s'écarte que fort peu de l'axe ancien, et ne fasse que de très-petites oscillations pendant toute la durée du mouvement. Il faut pour cela que l'axe de rotation soit un des deux *axes principaux* extrêmes du mobile.

La propriété dont jouissent les axes principaux étant de la plus haute importance, nous entrerons dans quelques détails à cet égard.

Dans un corps quelconque, il existe toujours trois lignes droites, perpendiculaires entre elles, se coupant au centre de gravité, autour desquelles le corps peut tourner indéfiniment, sans que ces axes de rotation se déplacent, et comme s'ils étaient entièrement fixes. Ces axes prennent le nom d'*axes principaux.* Lorsqu'un corps n'est sollicité par aucune autre force que par la gravité, s'il commence à tourner autour de l'un de ces trois axes, il continuera indéfiniment à tourner avec une vitesse constante autour de cet axe, comme si celui-ci était fixe. Si, au contraire, le mouvement a lieu autour d'un autre axe quelconque, différent de ces trois, l'axe de rotation ne restera pas le même un seul moment, mais il changera continuellement pendant toute la durée du mouvement; de même la vitesse variera sans cesse.

Il y a néanmoins une différence essentielle entre les trois axes principaux d'un mobile. Autour des deux axes extrêmes, le mouvement de rotation est *stable,* c'est-à-dire que, si le corps tourne autour de l'un des deux axes extrêmes, et s'il survient une force qui écarte quelque peu l'axe de rotation de l'axe principal, le nouvel axe de rotation restera

toujours très-grès, et ne fera que de très-petites oscillations autour de l'ancien axe pendant toute la durée du mouvement. La vitesse de rotation restera de même à peu près constante. Il éprouvera une les vacations périodiques très-petites à la longue. Le mouvement de rotation est *stable* autour de l'axe moyen. Lorsque la rotation a lieu autour de ses axe, si la moindre cause vient à le troubler, le nouvel axe de rotation s'écartera indéfiniment de l'axe primitif moyen, et la vitesse de rotation variera sans cesse.

Si la démonstration de ces propriétés fut importante, si la théorie de les trouver, le lecteur trouvera place ici.

Il nous suffira de dire que, dans les corps de révolution, comme le corps à laquelle appartiennent les projectiles, l'axe de révolution est un axe principal, et que les deux autres axes sont deux lignes droites quelconques, perpendiculaires à l'axe de révolution, qui se coupent à angle droit.

Dans ces corps, l'axe seul de révolution est stable et autour des autres axes principaux, qui lui sont perpendiculaires, le peut avoir de stabilité.

Il en résulte, que les projectiles ayant excentriques ont pour axe principal stable la ligne droite passant par le centre de gravité et de figure, et que l'axe perpendiculaire autour duquel la rotation a lieu est instable.

Dans une sphère tous les diamètres sont des axes principaux. De sorte que tous ces axes sont également stables, ou plutôt il n'y a pas de stabilité. Différents à tout déplacement accidentel qui pourrait survenir, l'axe de rotation est porté de lui-même à des axes où autres à y rester et redevient immédiat

14. Moyens d'accroître l'efficacité du tir des armes à feu. — On peut parvenir de deux manières différentes à augmenter l'efficacité du tir des armes à feu, savoir: soit en annulant, ou du moins en atténuant, les causes fortuites qui produisent les déviations; soit en réduisant les causes fortuites à être des causes permanentes.

On atténue les causes fortuites, en augmentant l'instruction pratique des tireurs, surtout en ce qui concerne l'appréciation des distances à la vue, qui est la cause fortuite la plus influente sur le champ de bataille. On atténue encore les causes fortuites, en confectionnant les charges avec une grande uniformité; en restreignant les limites des poids et des diamètres des projectiles, ainsi que les limites de rebut des armes; en diminuant le vent, etc.

Ces précautions, et autres semblables, augmentent assurément la justesse du tir; mais ne détruisent pas la cause principale des déviations, qui est, comme nous l'avons dit plus haut, la rotation irrégulière du projectile.

A l'effet d'empêcher le mouvement de rotation, on a dans le temps essayé de remplacer la balle sphérique du fusil d'infanterie par une balle cylindro-sphérique. La partie cylindrique de la balle empêche la rotation de la balle dans l'intérieur de l'arme, mais elle ne l'empêche plus après sa sortie de l'arme. En effet, à peine l'axe de révolution de la balle s'écarte-t-il de la direction du mouvement, que la résistance de l'air cesse de se distribuer symétriquement autour du centre de gravité, et produit un mouvement de rotation.

On a proposé encore, pour empêcher le mouvement de rotation des projectiles sphériques, de déterminer pour chacun la ligne contenant les centres de gravité et de figure, et de placer, lors du chargement, cette ligne toujours dans la

direction de l'axe de l'âme. Les avantages que peut procurer cette précaution ne semblent pas compenser les embarras occasionnés par la recherche du centre de gravité et par son placement toujours identique.

En venant à la seconde solution du problème, nous trouvons d'abord la méthode employée autrefois en Prusse pour communiquer une rotation régulière aux projectiles creux. Cette méthode consiste à donner une excentricité artificielle constante au projectile, et une position déterminée au centre de gravité, relativement au centre de figure, dans l'âme de la bouche à feu. Cette méthode présente deux inconvénients, savoir:

1° Rotation autour d'un axe principal instable;

2° Difficulté d'assurer à chaque coup la même position du centre de gravité, surtout sur le champ de bataille.

Un autre moyen pour communiquer une rotation régulière aux projectiles, bien supérieur au précédent, consiste à forcer le projectile à s'engager dans les rayures en hélice tracées dans l'intérieur de l'âme. Le projectile, chassé par les gaz de la poudre, prend ainsi un mouvement de rotation autour de l'axe de l'âme en même temps qu'un mouvement de translation le long de cet axe. Si, en outre, le projectile a une forme allongée, la rotation sera stable parce qu'elle aura lieu autour d'un des axes principaux extrêmes, et la résistance de l'air, comparée au poids du projectile, sera moindre que pour un projectile sphérique.

On obtient ainsi une diminution des déviations irrégulières et un tir plus rasant, et par suite une augmentation de l'espace dangereux. Mais afin que la dernière condition soit remplie, il faut que le poids de la charge, comparé au poids du projectile, ne soit pas trop petit.

On a proposé un dernier moyen d'accroître l'efficacité du

tir. Ce moyen consiste à augmenter la stabilité de la rotation du projectile, en remplaçant la forme oblongue du projectile par une forme aplatie, et à tirer parti de la force de déviation, contraire à la pesanteur, provenant du mouvement de rotation dans lequel le point antérieur du projectile se meut de bas en haut.

M. le capitaine de Puydt, de l'artillerie belge, et l'Auteur de cet écrit furent amenés, par des voies différentes, à l'insu l'un de l'autre, à proposer ce moyen. M. de Puydt donne à son projectile la forme d'un disque et lui imprime la rotation au moyen d'une excentricité artificielle ; l'Auteur donne à son projectile une forme lenticulaire et lui communique la rotation à l'aide d'un canon courbe. Le projectile de M. de Puydt a été soumis à quelques expériences assez incomplètes, qui donnèrent des portées très-grandes. Le système proposé par l'Auteur est maintenant en cours d'expérimentation en Russie.

TROISIÈME PARTIE.

DES DIVERS GENRES DE TIR.

15. On distingue trois genres de tir, suivant les effets qu'on veut obtenir, savoir:

1° Le *tir direct* ou *de plein-fouet*, au moyen duquel on se propose de frapper directement un objet qu'on peut apercevoir;

2° Le *tir plongeant*, qui est destiné a faire pénétrer le projectile derrière une masse couvrante, de manière à frapper des objets garantis du tir direct;

3° Le *tir à feux verticaux*, au moyen duquel on se propose de frapper le but par la partie supérieure, en y faisant tomber dessus presque verticalement le projectile.

16. Tir de plein-fouet. — Le tir de plein-fouet s'exécute soit avec un seul projectile, soit avec plusieurs projectiles; dans le second cas, il prend le nom de *tir à balles*.

On a des tables, semblables à celles données dans la première partie, qui permettent de régler le tir de plein-fouet à un projectile ou à plusieurs projectiles.

Quant au tir à balles, il est bon d'observer que les diverses trajectoires que décrivent les balles lancées par

l'arme forment une gerbe de trajectoires. Il est clair que le tir devra être réglé sur la trajectoire moyenne de la gerbe.

Si, en tirant contre une cible verticale, on manque le but, on corrige la hausse en commençant par pointer de nouveau l'arme au centre de la cible et avec la même hausse, pour ramener exactement l'arme à la même position qu'elle avait lors du premier coup ; ensuite on augmente ou l'on diminue la hausse jusqu'à ce que le rayon visuel rencontre la cible au point atteint par le projectile. Il est évident que la hausse ainsi déterminée est celle qu'il faut employer pour atteindre le but; car, d'après le principe qui sert de fondement au pointage, les abaissements du projectile, à la même distance, sont indépendants de la hauteur du but. On procède de la même manière pour corriger la hausse horizontale, d'après la déviation latérale observée.

Si, en tirant sur un terrain horizontal, on n'obtient pas la portée voulue, on corrige la hausse de la manière suivante. On commence à mesurer à vue, ou autrement, la distance du point atteint au but ; ensuite on augmente ou l'on diminue la hausse du nombre de millimètres qu'on obtient en multipliant le double de la hausse totale par la distance qui sépare le point atteint du but, et en divisant par la distance de l'arme au but. (La hausse totale est la hausse mesurée en partant de la ligne parallèle à l'axe de l'arme, qui passe par le guidon). Cette règle suppose l'angle de chute double de l'angle de départ. Elle donne des résultats trop grands aux petites distances et de trop petits aux grandes distances.

Il importe d'avertir que, à moins de différences très-considérables, on ne doit pas se hâter de corriger la hausse,

surtout après les premiers coups qui sont toujours assez disparates.

Lorsqu'on connaît la distance, il faut se garder de céder à la tendance naturelle qui nous porte à changer sans cesse le pointage. On se comporte ordinairement comme si le projectile devait atteindre infailliblement le but, toutes les fois que l'arme est pointée convenablement. On ajoute de la sorte, aux déviations inévitables, des déviations volontaires qui font perdre toute efficacité au tir.

17. Tir plongeant. — Tandis que dans le tir direct la charge reste constante et que l'angle varie suivant la distance du but, dans le tir plongeant la charge et l'angle de tir varient en même temps, pour remplir la double condition d'effleurer la crête d'un parapet et d'atteindre un point déterminé derrière ce même parapet.

Pour des raisons de pratique dont nous n'avons pas à nous occuper ici, on emploie, dans l'artillerie de campagne, la même charge pour plusieurs distances successives, et, au contraire, on emploie, dans l'artillerie de siége, la même hausse pour toutes les distances. Mais il faut noter que, de la sorte, le point de chute n'est plus à notre choix et qu'il devient une conséquence forcée.

Dans le tir plongeant, on prescrit ordinairement de faire passer la trajectoire moyenne par la crête du parapet. Les diverses trajectoires se divisent alors en deux groupes à peu près égaux, les unes plus élevées que la trajectoire moyenne, les autres plus basses. Les projectiles qui décrivent ces dernières s'enfoncent dans le parapet, de sorte que la moitié seule des coups concourt à l'effet qu'on veut produire.

On pare à cet inconvénient en faisant passer la trajectoire

moyenne à une certaine hauteur au-dessus de la crête du parapet. Mais alors il faut éviter que les trajectoires plus élevées que la moyenne dépassent le terre-plein.

Il est clair qu'on aura la plus grande chance d'atteindre le terre-plein en déterminant la trajectoire moyenne, par la condition de passer par le centre du terre-plein, tout en passant au-dessus de la crête du parapet d'une quantité égale à la déviation moyenne.

Lorsqu'il s'agit de passer d'une combinaison d'angle et de charge, relative à une certaine distance, à une autre combinaison relative à la même distance, donnant un point de chute plus rapproché du parapet, il suffit de diminuer l'angle et d'augmenter la charge proportionnellement. Pour éloigner le point de chute du parapet, on augmente l'angle et l'on diminue proportionnellement la charge.

18. Tir à feux verticaux. — Le tir à feux verticaux ayant pour objet de frapper de haut en bas s'exécute avec de grands angles de projection, et la trajectoire est très-courbe. Les mortiers ne se tirent ordinairement que sous les angles de 60°, 45°, 30°. L'angle de 60° s'emploie pour enfoncer des voûtes ou des blindages horizontaux; l'angle de 45°, ou un angle un peu moindre, pour avoir des portées considérables et régulières; l'angle de 30°, pour tirer contre des blindages très-inclinés du côté de la batterie, et pour agir sur la surface du terrain au moyen des éclats du projectile.

Les tables de tir des mortiers donnent la relation des portées aux poids des charges de poudre, pour chacun des angles adoptés.

Lorsqu'il s'agit de corriger la charge nécessaire pour

obtenir une portée déterminée, on peut admettre comme règle approximative que les charges croissent proportionnellement aux portées. En réalité, les charges croissent d'abord moins rapidement que les portées, leur sont sensiblement proportionnelles dans un certain intervalle, et enfin elles croissent plus rapidement que les distances.

Il est bon de répéter ici l'avertissement donné à propos du tir de plein-fouet, savoir de ne pas trop se presser de corriger les charges, afin de ne pas ajouter aux causes inévitables de déviation d'autres causes provenant uniquement de notre volonté.

QUATRIÈME PARTIE.

DE QUELQUES PRÉJUGÉS CONCERNANT LE TIR.

Dans cette quatrième partie nous nous proposons de combattre quelques-uns des préjugés les plus communs qui ont cours sur le tir des armes à feu. De même que les autres préjugés nombreux qui tyrannisent l'esprit humain, ceux qui ont rapport au tir sont causés le plus souvent par de fausses interprétations de faits par eux-mêmes vrais et réels. Nous aurons soin de rechercher pour chacun d'eux les motifs qui ont pu y donner lieu.

19. La balle s'élève au-dessus de sa direction primitive en sortant de la bouche de l'arme (*). — Dès que le projectile est sorti de la bouche de l'arme, il commence, en vertu de la pesanteur qui attire tous les corps vers le centre de la terre, à s'abaisser au-dessous de sa direction primitive, et plus il avance, plus il s'en écarte. Ainsi toute la courbe décrite par le projectile se trouve sous la ligne droite dans le sens de laquelle il a été lancé.

(*) Il est superflu d'avertir que les préjugés sont imprimés en caractères **gras**, et les réfutations, en caractères ordinaires.

Nous avons dit que les croyances les plus absurdes proviennent souvent de faits mal interprétés: ce qui a donné lieu à cette erreur, et fait croire que le projectile, à peine sorti de l'arme, s'élève au-dessus de sa direction, c'est que, le plus souvent, la forme extérieure de l'arme est telle que la ligne de mire, par laquelle le tireur fait passer le rayon visuel, et qu'il croit être suivie par le projectile, est inclinée sur l'axe et étant prolongée coupe ce dernier à une certaine distance de la bouche.

De cette position relative de la ligne de mire et de l'axe, il résulte que la trajectoire, qui d'abord est de peu inférieure à l'axe, coupe la ligne de mire à une petite distance de la bouche, et passe au-dessus pour la couper ensuite une seconde fois au but en blanc. Or le tireur jugeant que l'axe et la ligne de mire sont une seule et même chose, et s'apercevant que la balle passe au-dessus de la ligne de mire, en conclut faussement qu'elle s'élève aussi au-dessus de l'axe de l'arme.

Assurément, pour frapper un but placé entre les deux intersections ci-dessus, il faut diriger la ligne de mire plus bas que le but; mais cela ne provient pas de ce que la balle s'élève au-dessus de l'axe, mais de ce qu'elle s'élève au-dessus de la ligne de mire.

Rien rarement le projectile part dans la direction exacte de l'axe. Les battements du projectile dans l'intérieur de l'âme, causés par la différence de diamètre du projectile et de l'âme, le recul de l'arme, sont autant de raisons qui font sortir le projectile dans une direction différente de celle de l'axe. L'expérience démontre que généralement le projectile part dans une direction légèrement plus élevée que celle de l'axe.

C'est à ce fait, s'il n'était par trop détourné, qu'on pourrait aussi attribuer la fausse croyance qui fait le sujet de

cet article. Mais il est à remarquer que la courbe parcourue par la balle est toujours inférieure à la direction suivant laquelle elle est partie.

Concluons donc que la balle peut bien sortir dans une direction différente de celle de l'axe, mais qu'elle ne s'élève jamais au-dessus de sa direction primitive.

Ajoutons encore qu'on a prétendu qu'une balle qui rase la terre est soulevée quelque peu dans sa course par l'air comprimé entre le terrain et la balle. Cet effet est bien loin d'être prouvé, et, comme nous le verrons plus loin, il est contredit par des expériences faites expressément. D'un autre côté, quand même il serait réel, le soulèvement de la balle n'aurait lieu que lorsque le tir est rasant, et non pas en général, comme le croient ceux qui sont dans l'erreur dont nous venons de parler.

20. La balle a plus de force à une certaine distance de la bouche de l'arme, qu'à la bouche même. — Galilée nous apprend que ce préjugé avait aussi cours de son temps. En effet, nous lisons dans son *Traité de fortification:* « Que personne n'admette cette opinion ridicule, que « l'artillerie produit plus d'effet à une certaine distance « que de près, car elle est tout à fait erronée » (*).

Tâchons de trouver d'où provient cette opinion ridicule.

La balle échappée à l'action de la poudre, éprouve une résistance en se mouvant dans l'air, d'autant plus forte que sa vitesse est plus grande, et cette résistance ne peut qu'en diminuer la vitesse. Si le mouvement est ascendant,

---

(*) *Nè sia chi tenga quell'opinione ridicolosa, che l'artiglieria faccia maggior effetto in una certa distanza, che da vicino; perchè è del tutto falsa.* Cap. XXIV (Tome XI, pag. 181, de l'édit. Albéri).

à cette première cause de ralentissement, il s'en ajoute une seconde provenant de la pesanteur. Il n'y a donc aucun doute que, si le projectile se meut de bas en haut ou horizontalement, sa force loin d'augmenter en avançant, doit décroître.

Reste à considérer le cas du mouvement descendant: alors la résistance de l'air en diminue bien encore la vitesse, mais la pesanteur au contraire l'augmente. Le cas peut se présenter où cette dernière surpasse celle-là, et que réellement le projectile acquière de la vitesse à mesure qu'il s'avance, au lieu d'en perdre; mais pour cela il faut que sa vitesse soit inférieure à celle qui rend la résistance de l'air égale à son poids. Or cette dernière vitesse est de beaucoup inférieure à celle dont sont ordinairement animées les balles lancées par la poudre.

La vitesse qu'une balle sphérique de plomb, du poids de 25 grammes, devrait avoir pour éprouver de la part de l'air une résistance égale à son poids, est à peine de 60^{m} environ, tandis que la vitesse que lui impriment 8 grammes de poudre, est de 434^{m}. A la distance de 500^{m}, la vitesse de la balle se maintient encore supérieure à 60^{m}. Cela signifie que la vitesse n'a pas cessé de décroître.

On démontre dans la Balistique que toute trajectoire prolongée indéfiniment d'un côté et de l'autre, a un point sur la branche descendante de la courbe, dans lequel la vitesse du projectile devient un minimum. La vitesse va en décroissant avant ce point, et ensuite elle va en croissant sans cesse en s'approchant toujours d'une limite fixe qu'elle ne peut jamais atteindre. Mais ce point où la vitesse devient minimum, est hors de la partie de la trajectoire que l'on considère dans le tir de plein-fouet; et il ne se trouve sur la trajectoire réellement parcourue par le projectile que

dans le tir très-courbe. Et même dans ce dernier cas il serait inexact de dire que le projectile augmente de vitesse en s'éloignant de la bouche; mais il faudrait dire que le projectile perd de sa vitesse, jusqu'à un certain point au delà duquel il en regagne, sans cependant pouvoir jamais dépasser une certaine limite.

De ce qu'on a dit jusqu'ici, on peut conclure que dans les cas ordinaires du tir des armes à feu, le projectile, loin d'acquérir de la force en s'éloignant de l'arme, en perd progressivement. Pour que le contraire fût vrai, il faudrait que le projectile sortît avec une vitesse très-faible, et que le tir fût incliné de haut en bas: conditions qui n'ont jamais lieu dans l'usage ordinaire des armes à feu.

Avant d'abandonner ce sujet, nous croyons ne pas devoir omettre une circonstance qui pourrait, jusqu'à un certain point, justifier l'erreur dont nous parlons. Immédiatement après la sortie du projectile, l'efflux des gaz de la poudre ne cesse pas, mais il continue encore quelque temps. Ces gaz peuvent, soit pousser encore quelque temps le projectile, soit en le précédant affaiblir la résistance de l'air. La conséquence en serait de porter plus loin de la bouche de l'arme le point où le projectile atteint sa plus grande vitesse. L'expérience seule pourrait nous éclairer à cet égard. En tout cas, le maximum de vitesse doit différer bien peu de la vitesse à la bouche de l'arme; le point qui y correspond doit se trouver à bien peu de distance de la bouche de l'arme, et en partant de ce point le projectile perd graduellement de sa vitesse à mesure qu'il avance.

21. Une vallée, une dépression de terrain, une nappe d'eau attirent le projectile; c'est pourquoi si l'on tire à travers une vallée, au-dessus d'une excavation de terrain,

d'un fleuve, etc., il faut, pour atteindre un but, donner à l'arme une élévation plus grande que dans la plaine. — Il est faux qu'une dépression de terrain puisse attirer le projectile: au contraire, si l'excavation était comparable à la masse du globe terrestre, on pourrait dire qu'une excavation produit l'effet contraire, c'est-à-dire qu'elle diminue l'attraction. Il n'est pas moins faux que l'eau attire le projectile plus que le terrain.

Il est difficile de deviner d'où et comment des idées aussi absurdes sont venues se nicher dans l'esprit de beaucoup de personnes. Peut-être cette opinion erronée provient-elle d'un fait indiqué par Piobert. Mais ce fait n'est nullement démontré, et il est certainement ignoré de tous ceux qui s'attachent à certaines idées bonnes ou mauvaises, sans s'inquiéter d'en rechercher l'origine.

Piobert dit: « Le fluide, dans lequel se meut le projectile lancé sous de petits angles au-dessus du sol, ne « peut pas être considéré comme indéfini dans tous les « sens; car la portion d'air, lancée du côté du sol par « l'hémisphère antérieur du mobile, rencontre un obstacle « résistant qui l'empêche de s'échapper et de se répandre « dans l'espace aussi facilement que les secteurs d'air « placés dans les autres directions, dans lesquels le fluide « conserve toute sa mobilité. Dans ce cas, le terrain, suivant sa forme entre la bouche à feu et le but, fait varier plus ou moins sa distance à la trajectoire, et a, par « conséquent, une influence plus ou moins grande. Cette « influence, dont ordinairement on ne tient pas compte « dans le tir, se fait sentir sur les portées jusque sous « l'angle de 3 degrés au-dessus du sol, quand ce sol est « uni; lorsque des élévations de terrain ou de fortes dépressions existent à de petites distances en avant de la

« bouche à feu, le coup peut, dans quelques circonstances, « être relevé à 300 ou 400 mètres, de 3 mètres dans le pre- « mier cas, et rabaissé de 2 mètres dans le second, com- « paravement à ce qui aurait lieu dans le cas du tir « ordinaire sur un sol uni. Le projectile est également « relevé dans le tir au-dessus de la surface de la mer, mais « comme, dans ce cas, cette surface se déprime, l'obstacle « offre moins de résistance, son influence est diminuée et, « sous les petits angles, les portées sont plus faibles que « sur terre. La réaction du sol diminue de même à mesure « que la bouche à feu est plus élevée au-dessus du ter- « rain; par suite, le projectile paraît s'abaisser compara- « tivement au tir ordinaire; cette apparence faisait dire « aux anciens canonniers: *la vallée attire le boulet* » (*).

Quelque respectable que soit la source de cette opinion, il n'y a point d'observation directe qui la confirme, et les efforts qu'on a faits pour la justifier sont demeurés vains. Ecoutons ce qu'en dit Didion: « La proximité du sol n'a pas « d'influence sur la forme de la trajectoire.

« On doit croire que si le fluide lancé par la partie in- « férieure du projectile rencontre du côté du sol un obsta- « cle qu'il ne rencontre pas dans la partie supérieure, cet « effet n'a lieu qu'après le passage du projectile, et que « ainsi la réaction du sol ne peut avoir aucune influence « sur le mouvement du projectile.

« Des expériences ont été faites à Metz en 1846, pour « reconnaître cette influence par le tir comparatif de deux « canons de 16, pointés exactement sous le même angle, « mais placés sur des plates-formes différemment élevées;

(*) PIOBERT, *Traité d'artillerie théorique et pratique. Précis de la partie élémentaire et pratique*; 2e édition, page 169.

« l'une enfoncée de 0m,72 au-dessous du sol, l'autre sur « le terrain, et la troisième élevée de 1m,04 au-dessus, ce « qui plaçait le centre de la bouche respectivement à « 0m,75, 1m,47 et 2m,51 au-dessus de ce terrain. Les canons « ont été tirés successivement aux charges de 1/6 et 1/3 du « poids du boulet; on a observé avec soin les hauteurs des « boulets aux distances de 100m, 200m et 400m, et l'on n'a « pu reconnaître de différence appréciable. Cependant les « résultats des expériences étaient très-précis, et, une in- « fluence capable de repousser ou d'attirer le projectile de « trois à quatre millimètres seulement, à la distance de « 100m, eût été rendue évidente » (*).

Des recherches expérimentales faites en Russie par M. Pélikan (**) sur la cause des contusions produites par ce qu'on appelle le *vent du boulet*, prouvent la nullité des effets de la compression de l'air. Le résultat de ces recherches a été, que le passage de gros projectiles à peu de centimètres d'un piston qui pouvait être mis en mouvement par la moindre pression de l'air, laissa le piston immobile.

On s'éloignerait peut-être moins de la vérité, en attribuant la cause du préjugé dont nous parlons à une erreur d'optique que l'on commet ordinairement quand on estime la distance à travers une vallée. En effet, les distances nous paraissent plus courtes que sur un terrain horizontal, de manière qu'il semble que le projectile n'arrive pas à la même distance que dans la plaine.

Dans la dernière campagne de Crimée où l'on a

(*) Didion, *Traité de balistique*, page 317.

(**) *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences de Paris*, 16 novembre 1857.

consommé une quantité extraordinaire de projectiles, il arrivait souvent, en parcourant les environs de Sébastopol, de rencontrer de nombreux ravins dont le terrain est coupé, et d'entendre, en en voyant le fond couvert de projectiles, ces mots: « Voilà une preuve de l'attraction des vallées pour les projectiles ».

Il me semble que, sans invoquer cette attraction hypothétique, on peut expliquer ce fait d'une manière beaucoup plus simple.

Tous les projectiles qui tombaient sur les pentes, vu leur grande inclinaison, roulaient en bas, et venaient se réunir au fond du ravin, où, au bout d'un certain temps, il s'en amassait un nombre considérable.

Assurément il ne sera jamais venu en tête à personne d'attribuer à l'attraction des vallées la propriété qu'ont les eaux de se réunir dans leur fond; cependant le cas est identique à celui des boulets, remarqué pendant le siége de Sébastopol.

22. La balle fond, ou devient incandescente dans l'intérieur de l'arme, au moment du tir, par l'effet de la chaleur développée par la combustion de la charge. — Le temps durant lequel la balle reste en contact avec les gaz développés par la combustion de la poudre est si court, que bien faible est l'accroissement que peut en recevoir sa température. On peut en avoir une preuve en observant l'élévation de température de l'arme; température qui est assez faible au premier coup, et ne devient considérable qu'après un nombre répété de coups.

On allègue comme preuve de l'échauffement de la balle sa température élevée quand on la ramasse après qu'elle a frappé contre un mur. Mais il faut se rappeler que cet

échauffement provient du choc même de la balle contre le mur, ou contre tout autre obstacle. Les battements de la balle dans l'âme, le frottement dans l'âme, la résistance de l'air, peuvent également y contribuer. Et en effet chacun sait que la percussion, le frottement, etc., sont toujours accompagnés d'un développement de chaleur, qui devient énorme dans certaines circonstances.

On a même remarqué dans quelques cas un développement de lumière au moment du choc, par exemple, lorsqu'on tire contre le pendule balistique. Mais, nous le répétons, ces effets calorifiques et lumineux doivent être attribués à la percussion, ou, pour parler en termes de mécanique, à la perte de force vive qui a lieu dans le choc, perte qui se transforme en une quantité correspondante de chaleur, et non pas à la chaleur communiquée par la combustion de la charge.

23. La poudre, légèrement humide, est plus forte que la poudre parfaitement sèche. — Il n'est pas nécessaire d'alléguer beaucoup de raisons pour démontrer que cette croyance est tout à fait erronée. La quantité de chaleur qu'absorbe l'eau contenue dans la poudre, pour passer à l'état de vapeur, diminue la tension des gaz dégagés par la poudre. En outre la combustion d'une poudre humide se fait imparfaitement, et beaucoup de parcelles de charbon y échappent et ne font qu'encrasser l'arme.

Quelqu'un pourrait peut-être avancer que l'humidité de la poudre, réduite en vapeur, doit en augmenter la force. On répond à cela que l'effet mécanique produit par une quantité donnée de chaleur, est indépendant de la nature des corps qui servent à la conversion de la chaleur en force; et qu'il est assurément préférable que la chaleur

produite par la combustion agisse sur les gaz de la poudre plutôt que sur l'eau qu'elle contient; car, en dérobant de la chaleur à la poudre, on en rend la combustion moins parfaite; d'où résulte une diminution dans la chaleur dégagée par la charge, et une augmentation de résidu dans l'arme.

Du reste, pour couper court à tous les doutes, nous allons rapporter les résultats d'une expérience décisive.

Vitesse initiale communiquée par 5 grammes de poudre de chasse à une balle du poids de 25,15 grammes dans le fusil lisse d'infanterie.

Poudre parfaitement sèche					335[m]
»	contenant	0,4	p. 100	d'humidité	332
»	»	1	»	»	303
»	»	2	»	»	270
»	»	3	»	»	219
»	»	4	»	»	201
»	»	8	»	»	139

La poudre, après avoir absorbé le 9 pour 100 d'humidité, ne pouvait plus être enflammée par la capsule. Chaque résultat est la moyenne de 5 coups. Chaque charge était composée de 5 grammes de poudre, plus l'humidité.

24. Plus on bourre la charge, plus l'effet en est grand. — L'opération de bourrer la charge peut avoir deux effets: de comprimer la poudre, ou d'augmenter la résistance à son expansion.

Chaque fois qu'on agit sur la poudre, on ne peut qu'en diminuer les effets, car on en brise les grains qui sont réduits, en partie, en poussier. Or, chacun sait que la poudre

contenant du poussier a moins de force que celle qui en est exempte. Donc, sous ce rapport, l'opération de bourrer fortement la poudre ne peut être que préjudiciable.

Quant à l'augmentation de la résistance à l'expansion des gaz, voici ce que l'expérience prouve: dans les canons et, en général, dans les cas où la poudre est employée en grande quantité, les bouchons plus ou moins résistants, le plus ou moins de force avec laquelle ils sont pressés, n'exercent pas une action sensible sur la vitesse imprimée au boulet. Mais dans les armes portatives, et en général, dans les cas où la poudre est employée en petites quantités, les bourres plus ou moins résistantes, et la manière dont elles sont refoulées, ont une influence notable sur la vitesse communiquée au projectile.

L'explication de ce résultat est, que la poudre, dont la combustion n'est point instantanée, brûle en plus grande proportion avant que le projectile se soit beaucoup déplacé, quand il rencontre un certain obstacle à son expansion. En outre, l'action de bourrer, en réduisant la charge à un moindre volume, augmente la tension des gaz. Cet effet, qui a une grande influence sur la combustion d'une petite charge, devient insensible quand il s'agit d'une forte charge, à cause de la grande quantité de chaleur qui s'en dégage.

Concluons que, dans les armes portatives, un refoulement qui n'a pour but que d'augmenter l'obstacle à l'expansion de la charge et de réduire l'espace qu'elle occupe, est utile; mais qu'il devient préjudiciable dès qu'il peut écraser la poudre.

Il est superflu d'ajouter que la résistance opposée à la charge ne doit pas dépasser une certaine limite, car autrement la résistance éprouvée par le projectile pourrait à la

fin contrebalancer l'avantage résultant d'une combustion plus complète: alors on tomberait dans l'inconvénient de diminuer la vitesse initiale, d'augmenter le recul et même de faire éclater l'arme (*).

25. On peut empêcher un projectile creux d'éclater, soit en le plongeant dans l'eau, ou mieux encore dans le vinaigre, soit en bouchant la fusée, soit enfin en arrachant la fusée. — La combustion de la matière dont est composée la fusée, de même que celle de la poudre, ne se fait pas au moyen de l'oxygène de l'atmosphère, mais aux dépens de l'oxygène contenu dans le salpêtre. Il est donc inutile d'empêcher l'accès à l'oxygène de l'air, puisque le corps qui brûle trouve en lui-même l'oxygène nécessaire. Au contraire, en cherchant à étouffer la fusée, on produit l'effet contraire, car en augmentant la pression des gaz qui se développent, on rend la combustion plus vive. L'expérience suivante, facile à répéter, en prouve la vérité: allumez une fusée, puis plongez-la dans l'eau, vous verrez que la combustion, loin de cesser, continue au contraire avec plus de vivacité que dans l'air. Que le vinaigre, ou le vin, soit plus propre à éteindre la fusée, c'est une puérilité sur laquelle il est inutile de s'arrêter.

On cite l'exemple de soldats courageux qui, en se précipitant sur des bombes tombées, ont réussi à les étouffer et à en empêcher l'explosion. Cela ne doit pas surprendre, car, comme il arrive souvent que la fusée ne prend pas feu en partant, ou que le feu ne se communique pas à la poudre

(*) Un refoulement trop fort ne peut plus avoir lieu aujourd'hui dans les armes de guerre, puisque, pour l'infanterie, la charge est contenue dans une cartouche métallique de volume invariable, et, pour l'artillerie, parce que la charge occupe toujours le même volume. *(Note de 1873).*

renfermée dans le projectile, à cause de quelque défaut de construction, il arrive qu'on attribue à cet acte courageux l'effet qui est uniquement dû à l'imperfection de la fusée.

Quiconque cherche à empêcher l'explosion d'une bombe en étouffant la fusée, expose inutilement sa vie.

Quant au moyen d'empêcher l'explosion d'une bombe en arrachant la fusée, nul doute que, si c'était possible, on en empêcherait l'explosion. Mais il faut savoir que l'opération d'extraire la fusée exige du temps et des ustensiles particuliers; que si cette opération est possible dans une salle d'artifices, elle ne l'est plus sur le champ de bataille pendant que la fusée brûle. Peut-être cela était-il praticable anciennement, avant l'introduction des fusées, lorsqu'un bout de mèche en tenait lieu; mais aujourd'hui celui qui essaierait d'arracher la fusée à une bombe allumée, s'exposerait à une mort certaine.

On nous dira qu'en combattant l'efficacité des moyens ci-dessus indiqués pour éviter l'explosion des bombes, nous tendons à refroidir l'élan généreux d'hommes qui se sacrifient pour le salut de leurs camarades. Nous répondons qu'il y a un moyen beaucoup plus utile de faire preuve de courage : c'est de relever promptement la bombe tombée, et de la jeter dans quelque endroit où l'explosion ne puisse faire mal à personne, ainsi que fit, sous Sébastopol, le soldat cité dans l'ordre du jour suivant du général Canrobert:

« Le 19 mars, dans la tranchée, un projectile creux lancé « par l'ennemi, tombé au milieu d'un groupe d'hommes de « garde, allait infailliblement en atteindre plusieurs par « ses éclats, lorsque le fusilier Davoine (Antoine), du 21me « de ligne, le saisit à deux mains et le lança sur le revers « de la tranchée, où il fit explosion.

« Le général en chef est heureux de pouvoir honorer « cet acte de courage en décernant, au nom de l'Empereur, « la médaille militaire au fusilier Davoine.

« Au grand quartier général, devant Sébastopol, le 22 « mars 1855.

« *Le Général en chef,*
« CANROBERT. »

26. Les poudres de mauvaise qualité repoussent plus fortement que les poudres de bonne qualité. Les poudres blanches ne font pas repousser l'arme. — Il faut distinguer deux cas: ou l'on parle de deux charges, égales en poids, que l'on compare, ou l'on parle de charges de poids inégal, mais qui produisent des effets balistiques égaux.

S'il s'agit de charges égales en poids, celle qui est formée d'une poudre plus faible repousse plus faiblement; c'est donc là précisément le contraire de ce que croient quelques-uns. En effet, dans l'action du tir, la quantité de mouvement imprimée à l'arme est égale à la quantité de mouvement imprimée au projectile, plus la quantité de mouvement imprimée à la matière même de la poudre. Or si une poudre est plus faible, c'est-à-dire, si à poids égal elle communique moins de vitesse à la balle, il est clair que les deux dernières quantités de mouvement sont moindres pour elle; et, par conséquent, moindre est la quantité de mouvement acquise par l'arme, qui est égale à leur somme; c'est-à-dire que la répulsion de l'arme est moindre.

Au contraire, quand il s'agit de charges de poudres d'espèce différente, dont les poids ont été réglés de manière à procurer les mêmes vitesses initiales au projectile, il est clair que la charge de la poudre plus faible devra donner plus de recul, puisque son poids sera plus

considérable que celui de la poudre plus forte, et par conséquent la quantité de mouvement de la matière même de la poudre sera plus considérable.

On peut trouver des charges telles de deux poudres d'espèce différente produisant la même répulsion ; et, à l'aide d'un peu de réflexion, on s'aperçoit que la poudre plus faible doit être employée en plus grande quantité, et doit imprimer à la balle une vitesse initiale plus petite que la poudre plus forte.

Ces raisonnements *a priori* sont pleinement confirmés par l'expérience. Nous rapporterons le parallèle fait entre une poudre à fusil avariée et de la poudre à fusil en bon état, essayées l'une et l'autre au fusil-pendule.

1° Parallèle avec des charges de poids égal:

	Vitesse	Recul (**)
Poudre avariée (charge 8gr) (*). . . .	298m	438m
Poudre en bon état (charge 8gr). . .	435	631

2° Parallèle avec des charges équivalentes:

	Vitesse	Recul
Poudre avariée (charge 12gr,04) . . .	435m	745m
Poudre en bon état (charge 8gr) . .	435	631

3° Parallèle à répulsions égales:

	Vitesse	Recul
Poudre avariée (charge 9gr,3)	383m	631m
Poudre en bon état (charge 8gr) . .	435	631

Quant à l'assertion que les poudres blanches ne produisent pas de recul, elle est complètement controuvée. Ces

(*) Cette poudre contenait 4,3 p. 100 d'humidité.

(**) Le recul est exprimé en vitesse de la balle, c'est-à-dire il est représenté par la vitesse que devrait avoir la balle pour produire, par son choc contre le fusil-pendule, un recul égal à celui qu'on produit par l'explosion de la charge.

poudres dont la base est le chlorate de potasse (*), si elles sont d'un emploi très-dangereux, à cause de la propriété qu'elles ont de prendre feu sous l'action d'un léger choc, et si elles détériorent les armes chimiquement à cause du chlore produit par l'inflammation, et mécaniquement par l'effet du développement trop rapide des gaz, elles sont, disons-nous, néanmoins plus fortes que les poudres ordinaires, à poids égal. Aussi peut-on obtenir, avec des charges moindres de ces poudres, des vitesses égales à celles que produit la poudre ordinaire; et, par conséquent, selon ce que nous avons dit plus haut, avec un moindre recul. Mais, à poids égal, elles produisent naturellement une plus forte répulsion.

Les phénomènes que présente le coton fulminant sont les mêmes pour ce qui a rapport à la répulsion.

27. Plus la charge d'une arme à feu est forte, plus les effets en sont puissants. — En augmentant la charge de poudre, la vitesse du projectile n'augmente que jusqu'à une certaine limite au delà de laquelle la vitesse du projectile ne fait que diminuer. Pour se convaincre de cette vérité, il suffit de considérer la charge de poudre dans les deux cas extrêmes. Considérons d'abord l'âme de l'arme entièrement remplie de poudre, excepté la place occupée par le projectile: ce dernier se trouvant en ce cas chassé de l'arme par la première impulsion, et l'action de la

(*) Quelques-unes de ces poudres sont composées de :
Chlorate de potasse,
Prussiate de potasse,
Sucre.
D'autres, de couleur grise, contiennent :
Chlorate de potasse,
Charbon,
Soufre.

poudre cessant à peu près entièrement sur lui au sortir de l'arme, il est clair que la vitesse imprimée au projectile sera assez faible et moindre que celle qui lui aurait été imprimée par une charge moindre. D'un autre côté, on sait qu'une charge très-petite ne produit qu'une petite vitesse. Il y a donc entre ces deux charges une charge intermédiaire qui communique à la balle la plus grande vitesse possible, et telle que, soit qu'on la diminue, soit qu'on l'augmente, la vitesse du projectile en sera affaiblie.

La charge qui produit le plus grand effet dans chaque arme est ordinairement plus forte que celle dont on se sert dans la pratique; c'est pourquoi les esprits peu réfléchis, voyant augmenter les effets quand on augmente les charges ordinaires, en déduisent erronément, sans se soucier de réfléchir davantage, que les effets de la charge croissent indéfiniment à mesure qu'on l'augmente.

L'existence d'une charge donnant une vitesse maximum, dépend de ce que, à mesure que la charge de poudre croît, deux effets contraires se produisent. D'une part la masse des gaz, que développe la combustion, augmente; de sorte que la force d'impulsion décroît moins rapidement pendant que le projectile s'avance. D'autre part, l'espace que parcourt le projectile diminue; de sorte que l'espace, le long duquel agit cette force d'impulsion, est moindre. Ainsi des deux éléments dont dépend la vitesse initiale, savoir: la force d'impulsion et le chemin le long duquel elle agit, l'un varie en sens opposé de l'autre. L'expérience, ainsi que les considérations mathématiques, démontre que, lorsqu'il s'agit de petites charges, le premier élément a une plus grande influence que le second, et que le contraire a lieu pour les fortes charges.

NOTE.

DISCUSSION DU PRINCIPE SUR LEQUEL EST FONDÉE TOUTE LA THÉORIE DU POINTAGE.

28. Toute la théorie du pointage des armes à feu repose sur ce principe, que *la distance verticale entre un point quelconque de la trajectoire et la direction de la vitesse initiale, est indépendante de l'angle que cette direction forme avec l'horizon.*

Ce principe n'est absolument exact que lorsque la résistance du milieu est nulle, ou proportionnelle à la première puissance de la vitesse; avec toute autre loi de résistance, il n'est qu'approximatif.

Lorsque le mouvement a lieu dans le vide, ou dans un milieu qui résiste en raison de la simple vitesse, le mouvement du projectile peut se décomposer en deux autres mouvements, selon deux axes quelconques, qui s'effectuent indépendamment l'un de l'autre, comme s'ils avaient lieu l'un après l'autre. Mais cette décomposition n'est plus possible lorsque la résistance est exprimée par toute autre fonction de la vitesse; parce que les composantes de la résistance suivant deux axes coordonnés ne sont proportionnelles aux composantes de la vitesse suivant les mêmes axes que dans le cas de la résistance en raison de la première puissance de la vitesse. Pour n'avoir pas tenu

compte de cette circonstance, plus d'un auteur qui a écrit sur la balistique est tombé dans l'erreur, et c'est en cela précisément que pèche la théorie balistique de Lombard, de Hutton, de Scheer de Lionastre, etc. [1].

Pour procéder avec toute la rigueur désirable, il faut déterminer les limites entre lesquelles est comprise l'erreur que l'on commet en adoptant le principe relatif à l'indépendance entre la flèche d'un arc de trajectoire et l'angle de projection. A cet effet nous nous servirons des formules que nous avons données dans le Tome I de ces *Mémoires*, § 23, page 119.

En désignant par $f(u)$ la fonction de la vitesse u du projectile, qui représente la résistance du milieu, divisée par le poids apparent du projectile, on a entre la vitesse et l'angle que celle-ci forme avec l'horizon, la relation

$$d(u\cos\theta) = uf(u)\,d\theta.$$

Cette équation qui n'est intégrable que pour quelques

(1) [illegible], *Traité du mouvement des projectiles* (Dijon, an. V). — Hutton, *Tracts on mathematical and philosophical subjects* (London, 1812). — Scheer de [illegible], *Théorie balistique* (Liard, 1827) — Ces trois auteurs décomposent le mouvement du projectile suivant la direction de la vitesse initiale et de la verticale; mais tandis que les deux premiers n'appliquent leurs formules qu'au tir sous les petits angles, le dernier les étend au tir courbe.

[illegible] *Théorie du vol des bombes* (Paris, 1738) — Cet auteur décompose le mouvement suivant deux axes orthogonaux, l'un horizontal et l'autre vertical, considère [illegible] et applique sa théorie au tir courbe.

Pour que la décomposition du mouvement fût exacte, il faudrait que le résultat [illegible] ne changeât pas en variant les axes suivant lesquels la décomposition [illegible] n'est pas vrai, comme il est facile de s'en convaincre.

[illegible] ces auteurs ne doivent être regardées que comme [illegible] ne fait [illegible] pour complément indispensable l'évaluation [illegible] à laquelle elle conduisent.

valeurs de $f(u)$, le devient immédiatement quand on substitue à $f(u)$ cette autre fonction

$$\frac{f(\alpha u \cos\theta)}{\alpha \cos\theta};$$

α étant une constante égale à une moyenne entre les valeurs qu'acquiert $\frac{1}{\cos\theta}$ entre les limites que l'on considère. Si l'on fait, pour abréger,

$$\alpha u \cos\theta = v;$$

en ayant égard à l'équation

$$g\,dx = -u^2 d\theta,$$

on obtient

$$y = x \operatorname{tang}\theta_0 - \alpha^2 g \int_0^x dx \int_0^x F(x)\,dx,$$

où

$$F(x) = \frac{1}{v^2}, \qquad \int_v^{v_0} \frac{v\,dv}{f(v)} = \alpha g x;$$

x et y étant les coordonnées horizontales et verticales de la courbe.

Si l'on veut rapporter la trajectoire à deux axes obliques, celui des X suivant la direction de la vitesse initiale u_0, l'autre des Y suivant la direction de la pesanteur, on a, pour passer du système des axes orthogonaux x, y à celui des axes obliques,

$$x = X\cos\theta_0,$$

$$y = X\sin\theta_0 - Y.$$

De sorte qu'on obtient pour l'équation de la trajectoire, rapportée à la tangente et à la verticale, en faisant $\alpha x = z$,

$$Y = g \int_0^{\alpha X \cos \theta_0} dz \int_0^z F(z, v_0)\, dz ,$$

où

$$v_0 = \alpha u_0 \cos \theta_0 , \qquad F(z, v_0) = \frac{1}{v^2} ,$$

v étant déterminé par l'équation

$$\int_v^{v_0} \frac{v\,dv}{f(v)} = gz .$$

Si l'on fait, pour abréger,

$$Z = \alpha X \cos \theta_0 ,$$

et

$$g \int_0^Z dz \int_0^z F(z, v_0)\, dz = E(Z, v_0) ,$$

l'abaissement vertical du projectile au-dessous de l'axe de l'arme, sera exprimé par

$$Y = E(\alpha X \cos \theta_0, \alpha u_0 \cos \theta_0) .$$

Maintenant remarquons que, si le degré de la fonction $f(u)$ est supérieur au premier (ce qui se vérifie dans un milieu tel que l'air), en attribuant à α une valeur inférieure à toutes celles qu'acquiert $\frac{1}{\cos \theta}$ dans l'étendue de l'arc de courbe considéré, on rend la résistance moindre que celle qui a réellement lieu dans la même étendue; tandis qu'on

obtient tout le contraire, si l'on prend pour α une valeur supérieure à celles que peut recevoir $\frac{1}{\cos\theta}$ entre les mêmes limites.

Cela posé, la valeur de Y qui correspond à un même X, devient plus petite, quand on suppose la résistance plus petite, et au contraire elle devient plus grande, en supposant la résistance plus grande. Il suffit pour le démontrer de considérer la première équation de la page 118 du Tome I de nos *Mémoires*, c'est-à-dire

$$y = x\left(\operatorname{tang}\theta_0 + \frac{1}{a u_0 \cos\theta_0}\right) + \frac{1}{a^2 g}\log\left(1 - \frac{a g x}{u_0 \cos\theta_0}\right),$$

qui est l'équation de la trajectoire dans un milieu qui résiste en raison de la vitesse. En changeant les coordonnées, il vient

$$Y = -\frac{X}{a u_0} - \frac{1}{a^2 g}\log\left(1 - \frac{a g X}{u_0}\right),$$

et, développant en série,

$$Y = \frac{g X^2}{2 u_0^2} + \frac{a g^2 X^3}{3 u_0^3} + \frac{a^2 g^3 X^4}{4 u_0^4} + \text{etc.}$$

Pour adapter cette équation au cas d'une résistance quelconque, il faut faire la constante a égale à une moyenne entre les différentes valeurs que reçoit $\frac{f(u)}{u}$, entre $u = u_0$ et u. En faisant croître la résistance $f(u)$, a croît aussi, si $f(u)$ est d'un degré supérieur au premier. A la simple inspection de la valeur de Y, il est facile de reconnaître que si a croît, Y croît aussi. Donc Y et la résistance varient dans le même sens.

La plus petite valeur que $\frac{1}{\cos\theta}$ peut prendre, est l'unité ;

donc la valeur de $\alpha = 1$ doit rendre la résistance trop petite dans toute l'étendue de la trajectoire; par conséquent

$$E(X \cos \theta_0, u_0 \cos \theta_0)$$

est une quantité toujours plus petite que l'ordonnée de la trajectoire, quel que soit l'angle de projection θ_0.

Quand on considère un arc de la courbe compris entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = -\theta_0$, il est évident que, dans cet intervalle, $\frac{1}{\cos \theta}$ est toujours plus petit que $\frac{1}{\cos \theta_0}$. Donc la valeur de $\alpha = \frac{1}{\cos \theta_0}$ rend la résistance trop grande; et par conséquent la quantité

$$E(X, u_0)$$

est plus grande que les ordonnées de la courbe, entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = -\theta_0$.

Remarquons que cette seconde limite est indépendante de l'angle de projection. Lorsque ce dernier est très-petit, les deux limites que nous venons d'indiquer, entre lesquelles est comprise l'ordonnée de la courbe, sont peu éloignées l'une de l'autre, et l'on peut prendre l'une des deux pour exprimer les ordonnées. En prenant la plus grande limite, on conclut que l'ordonnée de la trajectoire, rapportée à la direction de la vitesse initiale, est indépendante de l'angle que celle-ci forme avec l'horizon. Il reste à déterminer les limites de la différence des ordonnées, en passant d'une trajectoire qui correspond à l'angle θ_0 de projection à une autre qui correspond à un angle θ_0' de projection.

Soit θ_1 le plus petit des angles formés avec l'horizon par les éléments de la courbe qui correspond à l'angle θ_0, dans l'étendue de l'arc que l'on considère; et soit θ_2 le plus

grand de ces angles. Dans tout cet arc les ordonnées sont comprises entre les deux limites

$$E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right),$$

et

$$E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_2}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_2}\right).$$

De même, les limites relatives à la trajectoire obtenue avec l'angle de projection θ_0', sont

$$E\left(\frac{X\cos\theta_0'}{\cos\theta_1'}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0'}{\cos\theta_1'}\right),$$

et

$$E\left(\frac{X\cos\theta_0'}{\cos\theta_2'}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0'}{\cos\theta_2'}\right).$$

Soient l, L deux limites, la première plus petite, la seconde plus grande, des ordonnées de la trajectoire qui correspond à l'angle θ_0, moins les ordonnées de la trajectoire qui correspond à θ_0'; il est clair qu'on aura

$$l = E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right) - E\left(\frac{X\cos\theta_0'}{\cos\theta_2'}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0'}{\cos\theta_2'}\right),$$

$$L = E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_2}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_2}\right) - E\left(\frac{X\cos\theta_0'}{\cos\theta_1'}\ ,\ \frac{u_0\cos\theta_0'}{\cos\theta_1'}\right).$$

Quant à la manière de fixer la valeur des angles θ_1 et θ_2 remarquons que, si l'arc de courbe que l'on considère, est compris tout entier dans la branche ascendante, θ_1 sera

l'angle formé avec l'horizon par son extrémité supérieure, et θ_2 l'angle de son extrémité inférieure; si l'arc est tout entier dans la branche descendante, θ_1 sera l'angle de son extrémité la plus élevée, et θ_2 celui de l'extrémité inférieure; enfin, si l'arc comprend le sommet, θ_1 sera égal à zéro, et θ_2 égal à l'angle de l'extrémité la plus inclinée sur l'horizon.

On voit donc qu'il faut savoir trouver l'inclinaison de la courbe dans un point quelconque. Mais d'abord il faut noter que l'angle de la courbe et la résistance varient en sens inverse; c'est-à-dire que si l'on rend la résistance plus forte, l'inclinaison de la courbe décroît, pour une même distance mesurée sur la direction de la vitesse initiale. C'est ce que démontre l'équation

$$\text{tang}\,\theta = \text{tang}\,\theta_0 + \frac{1}{a u_0 \cos\theta_0} - \frac{1}{a u_0 \cos\theta_0 - a^2 g X \cos\theta_0},$$

qui donne l'angle de la courbe dans l'hypothèse de la résistance proportionnelle à la vitesse, et qu'on obtient en différentiant l'équation ci-dessus de la trajectoire dans cette hypothèse de résistance. En effet, en développant suivant les puissances ascendantes de X, on a l'expression

$$\text{tang}\,\theta = \text{tang}\,\theta_0 - \frac{gX}{u_0^2 \cos\theta_0} - \frac{ag^2X^2}{u_0^3 \cos\theta_0} - \frac{a^2g^3X^3}{u_0^4 \cos\theta_0} - \text{etc.}$$

qui nous fait voir que, tandis que a croît, θ décroît. Ainsi quand on assigne à la résistance une valeur trop grande, on est sûr de trouver un angle trop petit. Si, par exemple, dans l'avant-dernière formule, on fait

$$a = \frac{f(u_0)}{u_0},$$

on rend la résistance trop forte, quand $f(u)$ est d'un degré supérieur au premier, et l'on est sûr que l'angle θ qui en résulte est trop petit; et que par conséquent sa valeur absolue serait trop grande, dans le cas où θ serait négatif.

L'angle déterminé de cette manière pourra servir pour la valeur de θ_1, dans la branche ascendante, et pour celle de θ_2 dans la branche descendante.

L'hypothèse de la résistance en raison de la simple vitesse donne des angles très-exagérés, et en outre elle ne peut plus servir quand la valeur de X approche de celle qui satisfait à l'équation

$$X = \frac{u_0}{ag}.$$

On peut se servir, pour le même objet, de la formule (*)

$$\text{tang } \theta = \text{tang } \theta_0 - \alpha g \int_0^{\alpha X \cos \theta_0} F(z, v_0)\, dz,$$

dans laquelle, si l'on prend $\alpha = \frac{1}{\cos \theta_0}$, quand l'arc considéré appartient à la branche ascendante, on obtient pour θ un angle plus petit qu'il ne l'est en réalité, et par conséquent convenable pour θ_1.

La même valeur de $\alpha = \frac{1}{\cos \theta_0}$ sert encore pour le cas où l'angle θ_0 de la première extrémité de l'arc est plus grand que l'angle formé par l'autre extrémité, sans égard au signe. Mais quand ce dernier angle est plus grand que l'angle θ_0, alors on peut partir d'une valeur de α égale à la sécante de l'angle fourni par l'hypothèse de la résistance

(*) Voyez le Tome I de ces *Mémoires*, § 23, pag. 121.

proportionnelle à la vitesse. L'angle de chute obtenu au moyen de cette première supposition, étant introduit dans la valeur de α, pourra servir à son tour pour en obtenir un autre plus petit au moyen de la même équation, et ainsi de suite.

Il est à remarquer que, quelle que soit la valeur de θ, d'où l'on part pour calculer la valeur de θ_2, au moyen de ces substitutions successives, les différentes valeurs successives de θ que l'on obtiendra convergeront vers une limite fixe.

Pour montrer l'usage des expressions que nous venons de trouver des limites l et L, nous comparerons entre elles les trajectoires obtenues avec les angles de projection θ_0, 0, et $-\theta_0$.

Quand $\theta_0' = 0$, les deux limites de la différence entre les ordonnées du tir horizontal, et du tir incliné sous l'angle θ_0, deviennent

$$l = E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_1}, \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right) - E\left(\frac{X}{\cos\theta_2'}, \frac{u_0}{\cos\theta_2'}\right),$$

$$L = E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_2}, \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_2}\right) - E(X, u_0),$$

puisque $\theta_0' = 0$, $\theta_1' = 0$. Si dans la trajectoire inclinée on ne considère que l'arc compris entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = -\theta_0$, on aura $\theta_1 = 0$, et $\theta_2 = \theta_0$; et, par suite,

$$l = E(X\cos\theta_0, u_0\cos\theta_0) - E\left(\frac{X}{\cos\theta_2'}, \frac{u_0}{\cos\theta_2'}\right),$$

$$L = 0.$$

La limite supérieure des ordonnées de la trajectoire

inclinée, moins celles de la trajectoire horizontale, étant égale à zéro, il s'ensuit que ces dernières sont plus grandes que les premières dans l'intervalle entre deux points où la tangente est également inclinée à l'horizon. Donc en passant du tir horizontal à un tir incliné au-dessus de l'horizon, pour une même distance mesurée sur la direction de la vitesse initiale, l'abaissement du projectile au-dessous de cette direction est moindre dans le tir incliné que dans le tir horizontal, dans l'intervalle compris entre l'origine et le point où l'angle de chute est égal à l'angle de projection.

Si $\theta_0' = -\theta_0$, et si l'on ne considère que la partie comprise entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = -\theta_0$ de la trajectoire obtenue avec l'angle de projection θ_0, de sorte qu'on puisse prendre $\theta_2 = \theta_0$, $\theta_1 = 0$, les limites deviennent

$$l = E(X\cos\theta_0, u_0\cos\theta_0) - E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_2'}, \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_2'}\right),$$

$$L = E(X, u_0) - E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_1'}, \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_1'}\right).$$

Par conséquent, dans le tir incliné sous l'horizon, où $\theta_1' = \theta_0$, on a

$$L = 0.$$

On en conclut que, pour une même abscisse, les ordonnées entre $\theta = \theta_0$ et $\theta = -\theta_0$ d'une trajectoire inclinée au-dessus de l'horizon sont moindres que celles d'une trajectoire également inclinée au-dessous de l'horizon.

Lorsque le tir a lieu sous de petites élévations, les angles θ_0, θ_1, θ_2 etc. sont assez petits pour qu'on puisse

négliger leurs puissances supérieures. Dans ce cas, en développant les expressions des limites selon les puissances ascendantes des angles, et en négligeant les quatrièmes puissances, on trouve

$$l = \frac{1}{2}\left(X\frac{dE(X,u_0)}{dX} + u_0\frac{dE(X,u_0)}{du_0}\right)(\theta_1^2 + \theta_0'^2 - \theta_0^2 - \theta_2'^2),$$

$$L = \frac{1}{2}\left(X\frac{dE(X,u_0)}{dX} + u_0\frac{dE(X,u_0)}{du_0}\right)(\theta_2^2 + \theta_1'^2 - \theta_0^2 - \theta_0'^2),$$

où

$$\frac{dE(X,u_0)}{dX} = g\int_0^X F(z,u_0)\,dz$$

$$\frac{dE(X,u_0)}{du_0} = g\int_0^X dz\int_0^z \frac{dF(z,u_0)}{du_0}\,dz.$$

29. Pour donner une idée de la grandeur des limites l et L de l'erreur que l'on commet en adoptant le principe qui forme le sujet de cette discussion, il est bon de faire quelque application numérique aux cas les plus ordinaires de la pratique. Nous nous occuperons du tir de l'ancien fusil d'infanterie à balle sphérique, et du canon lisse de 6 livres de campagne. Nous supposerons d'abord la résistance proportionnelle au carré de la vitesse, et ensuite proportionnelle au carré et au bicarré de la vitesse. Nous ferons dans le premier cas

$$f(u) = \frac{u^2}{2gk},$$

de sorte qu'on aura

$$F(z, v_0) = \frac{1}{v_0^2} e^{\frac{z}{k}},$$

[1] $$E(Z, v_0) = \frac{gk^2}{v_0^2}\left(e^{\frac{Z}{k}} - \frac{Z}{k} - 1\right),$$

$$\frac{dE(X, u_0)}{dX} = \frac{gk}{u_0^2}\left(e^{\frac{X}{k}} - 1\right),$$

$$\frac{dE(X, u_0)}{du_0} = -\frac{2gk^2}{u_0^3}\left(e^{\frac{X}{k}} - \frac{X}{k} - 1\right),$$

[2] $$X\frac{dE(X, u_0)}{dX} + u_0\frac{dE(X, u_0)}{du_0} =$$

$$\frac{gk}{u_0^2}\left[e^{\frac{X}{k}}(X - 2k) + X + 2k\right],$$

[3] $$\operatorname{tang}\theta = \operatorname{tang}\theta_0 - \frac{gk}{a u_0^2 \cos^2\theta_0}\left(e^{\frac{aX\cos\theta_0}{k}} - 1\right).$$

Dans le second, nous ferons

$$f(u) = \frac{u^2}{2gk}\left(1 + \frac{u^2}{c^2}\right);$$

de sorte qu'on aura

$$F(z, v_0) = \left(\frac{1}{v_0^2} + \frac{1}{c^2}\right)e^{\frac{z}{k}} - \frac{1}{c^2},$$

[I] $$E(Z, v_0) = gk^2\left(\frac{1}{v_0^2} + \frac{1}{c^2}\right)\left(e^{\frac{Z}{k}} - \frac{Z}{k} - 1\right) - \frac{gZ^2}{2c^2},$$

$$\frac{dE(X,u_0)}{dX} = gk\left(\frac{1}{u_0^2}+\frac{1}{c^2}\right)\left(e^{\frac{X}{k}}-1\right)-\frac{gX}{c^2},$$

$$\frac{dE(X,u_0)}{du_0} = -\frac{2gk^2}{u_0^3}\left(e^{\frac{X}{k}}-\frac{X}{k}-1\right),$$

[II] $$X\frac{dE(X,u_0)}{dX}+u_0\frac{dE(X,u_0)}{du_0} =$$

$$\frac{gk}{u_0^2}\left[e^{\frac{X}{k}}\left\{X\left(1+\frac{u_0^2}{c^2}\right)-2k\right\}+X\left(1-\frac{u_0^2}{c^2}\right)+2k\right]-\frac{gX^2}{c^2},$$

[III] $$\text{tang}\,\theta =$$

$$\text{tang}\,\theta_0-\frac{gk}{\alpha u_0^2\cos^2\theta_0}\left(1+\frac{\alpha^2u_0^2\cos^2\theta_0}{c^2}\right)\left(e^{\frac{\alpha X\cos\theta_0}{k}}-1\right)+\frac{\alpha^2gX\cos\theta_0}{c^2}.$$

Application au fusil lisse d'infanterie.

Au moyen de l'expérience, on a trouvé que le fusil d'infanterie, avec la charge de 8 grammes de poudre, imprime à la balle sphérique du poids de 25 grammes la vitesse de 434^m; et que, tiré horizontalement, l'abaissement de la balle, à la distance de 200^m, est de 1^m,95. Conformément au principe de l'indépendance de l'abaissement de l'angle de projection, pour atteindre un objet placé à la distance de 200^m, au niveau de la bouche du fusil, il faut diriger l'axe du fusil à 1^m,95 plus haut que le but. On demande si, le fusil étant disposé de la sorte, la balle frappera le but.

On a, dans ce cas,

$$\text{tang}\,\theta_0 = \frac{1{,}95}{200} = 0{,}00975\,,$$

et, par suite,

$$\theta_0 = 33',5 = 0{,}00974\,.$$

On a de plus

$$\theta_1 = 0\,, \qquad \theta_0' = 0\,, \qquad \theta_1' = 0.$$

Pour calculer les valeurs de θ_2 et de θ_2', on commencera par supposer la résistance de l'air proportionnelle à la simple vitesse; et à l'aide de ces premières valeurs qui, comme nous l'avons dit, sont trop grandes, on calculera, au moyen de l'équation [3] ou [III], d'autres valeurs plus approchées.

Dans le cas de

$$f(u) = \frac{u^2}{2gk}\,,$$

en déterminant le coefficient k par la condition d'avoir un abaissement de $1^m,95$ à 200^m, on trouve

$$k = 122.$$

L'équation [2], après les substitutions convenables, donne

$$X\frac{dE}{dX} + u_0\frac{dE}{du_0} = 1{,}38\,;$$

de sorte que les deux limites deviennent

$$l = -\frac{1}{2}(1.38)(\theta_0^2 - \theta_2^2).$$

$$L = \frac{1}{2}(1.38)(\theta_2^2 - \theta_0^2).$$

Comme on a

$$a = \frac{f(z_0)}{z_0} = \frac{z_0}{2gk} = 0{,}1814,$$

on obtient les premières valeurs

$$\theta_2 = -2^\circ 45', \qquad \theta_2' = -3^\circ 18',$$

lesquelles, étant introduites dans l'équation [3], fournissent les valeurs plus approchées

$$\theta_2 = -57' = -0{,}0166$$

$$\theta_2' = -1^\circ 31' = -0{,}0265.$$

En substituant ces valeurs dans l'expression des limites, il vient

$$l = -0^m{,}00055$$

$$L = 0^m{,}00013.$$

Ainsi, dans le cas de la résistance de l'air en raison du carré de la vitesse, en dirigeant l'axe du fusil à $1^m{,}95$ au-dessus du but placé au niveau de la bouche de

l'arme, on est sûr d'atteindre un point qui s'éloigne du but moins de 55 centimillimètres.

Quand on suppose la résistance de l'air en raison du carré et du bicarré de la vitesse, en déterminant k par la condition de donner à 200^m un abaissement de 1^m,95, et étant $c = 696$, on obtient $k = 152$; et par conséquent

$$X\frac{dE}{dX} + u_0\frac{dE}{du_0} = 1{,}78.$$

Au moyen de l'équation [III], on trouve

$$\theta_2 = -55',5 = -0{,}0161\ ,$$

$$\theta_2' = -1^\circ 29' = -0{,}0259\ ;$$

et enfin

$$l = -0^m{,}00068$$

$$L = -0^m{,}00015.$$

Il en résulte que, de toute manière, l'erreur commise est tout à fait insignifiante.

Les mêmes conditions du tir horizontal de l'exemple précédent étant admises, pour atteindre un but placé à la hauteur de 139^m,47, et à une distance de 200^m, mesurée sur une ligne droite inclinée de 45° sur l'horizon, il faut pointer au-dessus du but de 1^m,95, c'est-à-dire incliner l'axe du fusil de 45°. Avec ces données, il s'agit de trouver les limites de la distance du point frappé au but.

On a, comme ci-dessus, dans le cas de $f(u) = \frac{u^2}{2gk}$,

$$\theta_0' = 0, \qquad \theta_1' = 0, \qquad \theta_2' = -1^\circ\,31'.$$

Les inclinaisons de l'arc de la trajectoire à ses deux extrémités, sont $\theta_0 = 45^\circ$, et l'angle fourni par l'équation [3], où l'on fait $\alpha = \frac{1}{\cos\theta_0}$.

Il en résulte

$$\theta = 43^\circ\,55'.$$

Nous prendrons donc

$$\theta_1 = 43^\circ\,55' \qquad \text{et} \qquad \theta_2 = \theta_0 = 45^\circ.$$

Les angles étant assez grands, il faut employer les expressions finies des limites, qui se réduisent, dans le cas présent, à

$$l = E\left(\frac{X\cos\theta_0}{\cos\theta_0}, \frac{u_0\cos\theta_0}{\cos\theta_1}\right) - E\left(\frac{X}{\cos\theta_2'}, \frac{u_0}{\cos\theta_2'}\right),$$

$$L = 0.$$

En y substituant les nombres, on obtient

$$l = -0^m,02572.$$

Donc le point frappé sera plus haut que le but, et s'en éloignera certainement moins de $0^m,02572$; quantité à peine supérieure à une fois et demie le diamètre du projectile.

Quand on prend, pour loi de résistance,

$$f(u) = \frac{u^2}{2gh}\left(1 + \frac{u^2}{c^2}\right),$$

on trouve, au moyen de l'équation [III] où l'on fait $\alpha = \frac{1}{\cos\theta_0}$,

$$\theta_1 = 43^\circ\ 56'\ ;$$

et, eu égard à la valeur de la fonction E,

$$l = -\ 0^m,03238.$$

Supposons que le même tir horizontal que ci-dessus étant admis, le tir incliné se fasse avec l'angle de 85°; c'est-à-dire que la cible soit de $197^m,29$ plus élevée que la bouche du fusil; déterminer les limites de l'erreur que l'on commet en dirigeant l'axe de l'arme à $1^m,95$ au-dessus du but.

Comme on a

$$\theta_0 = 85^\circ\ ,$$

on trouve

$$\theta_1 = 84^\circ\ 52'.$$

Avec cette valeur, et avec les valeurs

$$\theta_2 = \theta_0 = 85^\circ$$

$$\theta_0' = 0\ , \qquad \theta_1' = 0\ , \qquad \theta_2' = 1^\circ\ 31'\ ,$$

on trouve

$$l = -\ 0^m,03665.$$

Donc le point frappé sera plus élevé que le but, d'une quantité certainement inférieure à $0^m,03665$; cette quantité dépasse de peu le double du diamètre du projectile.

Lorsqu'on fait

$$f(u) = \frac{u^2}{2gk}\left(1 + \frac{u^2}{c^2}\right),$$

on trouve également

$$\theta_1 = 84^\circ\ 52',$$

et par suite

$$l = -0^m,04571.$$

La seconde loi de résistance donne des limites un peu plus grandes que la première, mais les unes aussi bien que les autres peuvent être tout à fait négligées en présence des erreurs inévitables dues à l'estime fautive des distances, à l'imperfection dans la manière de diriger la ligne de mire, etc.

Application au canon lisse de 6 liv. de campagne.

Le canon de 6 liv. de campagne, chargé avec 1^k de poudre, imprime au boulet de 3^k une vitesse initiale de 477^m, et, pointé sous l'angle de projection de $2^\circ\ 7'\ 33''$, fournit une portée horizontale de 900^m; c'est-à-dire qu'à la distance de $900^m,62$ mesurée sur l'axe, le boulet s'est abaissé de $33^m,41$: on demande les limites de l'erreur commise, quand on donne à l'axe une inclinaison de 10°, pour atteindre un but placé à la distance de $900^m,62$, mesurée sur l'axe et plus bas que

celui-ci de $33^m,41$, et par conséquent plus élevé que la bouche du canon de $122^m,98$.

Dans le cas de la résistance proportionnelle au carré de la vitesse, en déterminant le coefficient k par la condition d'avoir un abaissement de $33^m,41$ à $900^m,62$, on trouve

$$k = 530.$$

Au moyen d'une première approximation, en supposant la résistance en raison de la vitesse, on trouve l'angle de chute égal à $12° 28',5$. Au moyen de cet angle, et de deux approximations successives, on obtient $3° 44'$, pour l'angle de chute.

Nous poserons donc

$$\theta_0 = 10, \qquad \theta_1 = 0, \qquad \theta_2 = 10°,$$

$$\theta_0' = 2° 7',5, \qquad \theta_1' = 0, \qquad \theta_2' = 3° 44'.$$

En substituant ces valeurs numériques dans l'expression des limites, qui sont dans ce cas

$$l = E(X \cos \theta_0, u_0 \cos \theta_0) - E\left(\frac{X \cos \theta_0'}{\cos \theta_2'}, \frac{u_0 \cos \theta_0'}{\cos \theta_2'}\right)$$

$$L = E(X, u_0) - E(X \cos \theta_0', u_0 \cos \theta_0'),$$

on trouve

$$l = -0^m,40897,$$

$$L = 0^m,01748.$$

Quand on suppose la résistance en raison du carré et du bicarré de la vitesse, on a

$$k = 693\,, \qquad \theta_2' = 3^\circ\,33'$$

et, par conséquent,

$$l = -0^m,65260\,,$$

$$L = 0^m,01573.$$

Ainsi l'erreur commise peut être négligée dans la pratique.

Supposons maintenant que l'axe du canon soit incliné de 45° ; il s'agit de trouver l'erreur commise. Ici la hauteur du but serait de $603^m,42$.

Dans le cas de la résistance proportionnelle au carré de la vitesse, on aura

$$l = -6^m,36869\,, \qquad L = 0^m,01748\,;$$

et dans le cas d'une résistance proportionnelle au carré et au bicarré, on aura

$$l = -7^m,51991\,, \qquad L = 0^m,01573.$$

Quoique les limites de l'erreur dans ce dernier exemple soient assez notables, cependant elles sont encore comparables aux erreurs que l'on commet par une évaluation inexacte de la distance ; en effet, dans le cas présent, l'angle de la dernière tangente avec l'horizon dépasse 54°,

de manière qu'une erreur de $5^m,46$ sur la distance horizontale produit une différence de $7^m,52$ en hauteur. Or, qui peut être certain de ne pas commettre une erreur de $5^m,46$ sur une distance de 900^m estimée à vue ou avec un télémètre de campagne? Il est de plus à remarquer que l'erreur commise est certainement inférieure, et peut-être notablement, à la valeur absolue des limites ci-dessus énoncées, entre lesquelles elle est comprise.

Par conséquent, quoique dans les milieux qui résistent en raison autre que celle de la simple vitesse, la distance verticale entre un point de la trajectoire et la direction de la vitesse initiale ne soit pas rigoureusement indépendante de l'angle de projection, cependant dans la pratique on peut négliger la différence.

SUR LE

VOLUME D'UNE EMBRASURE.

NOTE

SUR LE

VOLUME D'UNE EMBRASURE.

(*Journal des Armes spéciales et de l'État-Major*, 4me série, tome XII. Paris, 1859).

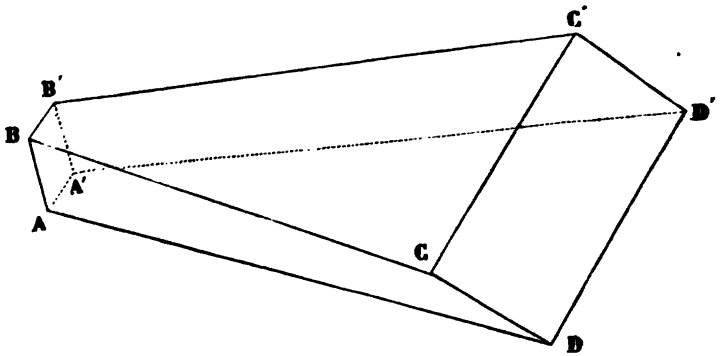
Les ouvrages qui traitent de la construction des batteries ne donnent point la manière d'évaluer le volume des embrasures. Cependant ce volume est susceptible d'une expression fort simple, à laquelle on peut parvenir facilement à l'aide de considérations purement géométriques. Nous nous proposons dans cette note de donner cette expression.

Une embrasure est un vide ménagé dans l'épaulement d'une batterie, pour donner passage à la volée d'une pièce d'artillerie quand on la tire.

Ce vide a la forme d'un prisme quadrangulaire $ABCD$-$D'C'B'A'$, à arêtes AA', BB', CC', DD' parallèles à la crête intérieure BB' de l'épaulement, terminé latéralement par les *joues* $ABCD$, $A'B'C'D'$.

Les joues sont des surfaces gauches qui peuvent être engendrées de deux manières différentes: soit par une droite mobile qui glisse sur les deux droites AB, CD, limites de la joue à l'ouverture intérieure et extérieure de

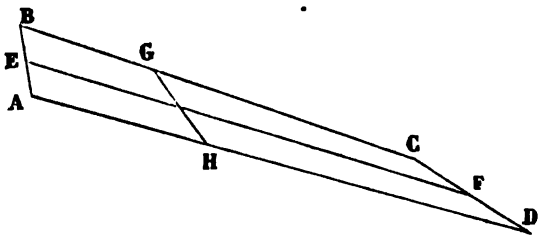
l'embrasure, de manière à les diviser en parties proportionnelles; soit par une droite mobile qui glisse sur les deux droites AD, BC, situées respectivement sur le fond de l'embrasure et sur la plongée de l'épaulement, de manière à les diviser en parties proportionnelles.



Au premier mode de génération correspond, d'une manière approximative, le revêtement des joues en saucissons; au deuxième, le revêtement en gabions.

Ces deux modes de génération produisent une seule et même surface, appelée *paraboloïde hyperbolique*, en raison de la nature des sections qu'elle admet.

Pour démontrer l'identité des surfaces engendrées des deux manières, il suffit de faire voir que les génératrices d'un mode de génération coupent toutes celles de l'autre.



Soit $ABCD$ le quadrilatère gauche qui limite la joue, et dont les côtés AB, BC, CD, DA sont respectivement sur l'ouverture intérieure, sur la plongée,

sur l'ouverture extérieure, et sur le fond de l'embrasure.

Dans le premier mode de génération, c'est-à-dire avec le revêtement en saucissons, une droite EF glisse sur les deux côtés opposés AB, CD du quadrilatère gauche, en les divisant en parties proportionnelles.

Dans le second, avec le revêtement en gabions, une droite GH glisse sur les deux autres côtés opposés BC, AD, en les divisant en parties proportionnelles.

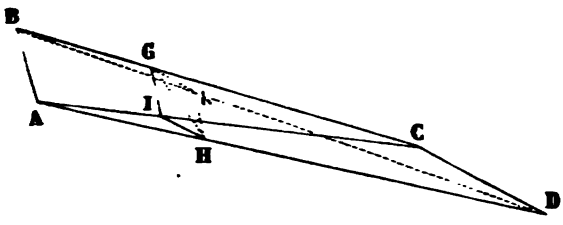
Or, nous savons par la Géométrie, que si on coupe les côtés opposés d'un quadrilatère gauche proportionnellement par deux droites, ces droites sont situées sur un même plan, et se coupent en un point (LEGENDRE, *Éléments de géométrie*. Livre V, Proposition XVI). Donc toutes les génératrices GH s'appuieront sur toutes les génératrices EF, et ne formeront avec celles-ci qu'une seule et même surface; ce qu'il fallait démontrer.

De ce que les génératrices d'un paraboloïde hyperbolique divisent les directrices en parties proportionnelles, il s'ensuit qu'elles sont parallèles à un même plan. En effet, si par deux côtés opposés du quadrilatère gauche, qui sert à construire le paraboloïde, on fait passer deux plans parallèles, tout plan parallèle à ceux-ci coupera les deux autres côtés en parties proportionnelles (LEGENDRE, *Éléments de géométrie*. Livre V, proposition XV), et la droite qui joint les points d'intersections sera une génératrice du paraboloïde.

D'où il suit que le même paraboloïde hyperbolique peut encore être engendré par une droite assujettie à glisser sur deux côtés opposés, et de plus à rester constamment comprise dans un plan parallèle aux deux autres côtés. Ce mode de génération est aussi double, comme le précédent.

Cela posé, venons à l'évaluation du volume d'un corps terminé par un paraboloïde hyperbolique. Qu'on tire les

deux diagonales AC, BD du quadrilatère gauche, et que l'on considère le tétraèdre formé par les quatre triangles ACB, ACD, ABD, BDC. Si l'on coupe ce tétraèdre par un système de plans parallèles



aux deux côtés opposés AB, CD, les sections qui en résulteront dans le tétraèdre seront des parallélogrammes, et dans le paraboloïde, des droites qui seront les diagonales de ces parallélogrammes. En effet, l'un quelconque de ces plans coupera les deux faces triangulaires ABC, ABD suivant deux droites GI, HK parallèles à AB, et par conséquent parallèles entre elles; pareillement il coupera les deux faces triangulaires CDA, CDB suivant les deux droites IH, GK parallèles à DC et partant parallèles entre elles. Donc la section faite par chaque plan dans le tétraèdre est un quadrilatère dont les côtés opposés sont parallèles. Par conséquent les côtés opposés sont égaux et la diagonale GH, qui est la génératrice du paraboloïde, divise la section en deux triangles égaux.

Il est facile de voir que si l'on coupait le tétraèdre par un système de plans parallèles aux deux autres côtés AD, BC du quadrilatère, les sections faites dans le tétraèdre seraient encore des parallélogrammes dont la diagonale serait l'autre génératrice du paraboloïde.

Puisqu'un plan mobile, constamment parallèle à deux côtés opposés du quadrilatère gauche, coupe le tétraèdre suivant des sections qui sont toujours divisées en deux parties égales, par la section faite dans le paraboloïde, il s'ensuit

que la surface de ce dernier coupe le tétraèdre en deux parties équivalentes; ce qui donne lieu au théorème suivant:

Un tétraèdre quelconque est partagé en deux parties équivalentes par la surface du paraboloïde hyperbolique qui passe par les quatre côtés du quadrilatère gauche qu'on obtient en réunissant ses quatre sommets.

Il s'ensuit que toutes les fois qu'un corps est limité d'un de ses côtés par un quadrilatère gauche, sur lequel est tracé un paraboloïde hyperbolique, il suffit, pour en avoir le volume, de mener des plans par les quatre sommets du quadrilatère pris trois à trois, et de prendre une moyenne arithmétique entre le solide terminé par les plans extérieurs et celui qui est terminé par les plans intérieurs.

On conclut de là que:

Le volume d'une embrasure est égal à la moitié de la somme des quatre prismes triangulaires tronqués qu'on obtient au moyen des deux diagonales tirées dans le quadrilatère gauche qui limite la joue.

Ce théorème s'applique tant à une embrasure directe qu'à une embrasure oblique. Si le fond de l'embrasure n'était point parallèle à la crête de l'épaulement, ce qui arrive lorsque la trace du plan de défilement, sur un plan horizontal, n'est point parallèle à la projection horizontale de la crête intérieure du parapet, alors au lieu de prismes tronqués, on aurait à considérer des polyèdres à faces quadrangulaires et triangulaires, dont le volume s'évaluerait en les décomposant en pyramides triangulaires.

FIN DU TOME DEUXIÈME.

TABLE DES MATIÈRES.

AVERTISSEMENT . . . . . pag. v

LES PROJECTILES LENTICULAIRES.

Préface . . . . . pag. 3

Nouveau projectile et nouvelle arme à feu . . » 7

NOTE *A*. Calcul de la résistance de l'air sur le projectile » 22

NOTE *B*. De la stabilité relative de la rotation des corps de révolution aplatis et oblongs . . . . » 28

NOTE *C*. Du mouvement de rotation communiqué au projectile par le choc contre une traverse fixe . . » 31

NOTE *D*. Du mouvement de rotation du projectile résultant de la courbure de l'âme. . . . . » 38

Considérations sur le tir des armes à feu rayées dans leur état actuel. Proposition d'un nouveau système de projectiles et d'armes à feu . . . . » 49

I. CONSIDÉRATIONS. . . . . » 49

II. PROPOSITIONS . . . . . » 64

DE LA POUDRE.

De la fabrication de la poudre. Considérations et propositions — Préface . . . . . pag. 91

I. *Revue rapide des principaux procédés suivis aujourd'hui pour fabriquer la poudre* . . . . . » 93

1. Procédé des pilons . . . . . » 93

2. Procédé des meules . . . . . » 96

3. Procédé des meules et de la presse . . . . » 98

4. Procédé des tonnes . . . . . » 99

5. Procédé des tonnes et de la presse . . . . » 100

II. *Considérations sur quelques points touchant la fabrication de la poudre* . . . . . » 102

1. De la fusion du salpêtre . . . . . » 102

2. Du charbon . . . . . » 103

3. Du dosage . . . . . » 105

4. De la trituration . . . . . » 111

5. De la formation de la galette . . . . . » 113

6. De la grosseur, de la forme et de la densité des grains » 115

7. Du lissage . . . . . » 121

8. Du séchage . . . . . » 122

9. De l'épreuve de la poudre . . . . . » 123

Description sommaire des procédés qu'on propose pour fabriquer les diverses espèces de poudre . . » 124

III. *De la construction et de la disposition des bâtiments composant une poudrerie* . . . . . » 130

IV. *Des bâtiments et de la puissance mécanique nécessaires à l'exploitation d'une poudrerie capable de fabriquer annuellement 600.000^{k} de poudre, dont 300.000 de mine, 200.000 de guerre, 100.000 de chasse* pag. 135

1. Ateliers à poudre . . . . . » 136

2. Ateliers divers . . . . . » 138

3. Magasins . . . . . » 139

4. Habitations . . . . . » 139

V. *Du moteur* . . . . . » 140

Du nitrate de soude au lieu du nitrate de potasse dans la poudre . . . . . » 143

Sur l'analyse du charbon destiné à la fabrication de la poudre . . . . . » 153

Résultats d'expériences faites à diverses hauteurs touchant la durée de combustion de la matière de la poudre . . . . . » 167

BALISTIQUE INTÉRIEURE.

Préface . . . . . pag. 187

Mouvement des projectiles dans les armes à feu . » 189

DU TIR.

Préface . . . . . pag. 225

PREMIÈRE PARTIE — *Du pointage.*

§ 1. Trajectoire . . . . . » 229

§ 2. Pointage . . . . . » 231

DEUXIÈME PARTIE — *De l'efficacité du tir.*

§ 3. [illegible] . . . . . pag. 237

§ 4. Plus grandes portées. — Limites des portées utiles » 238

§ 5. Causes des déviations . . . . . » 240

[illegible]

§ 6. Variations dues à la direction du projectile au départ » 243

§ 7. Variations dues à la vitesse initiale . . . » 249

§ 8. Variations dues à la résistance de l'air . . . » 250

§ 9. Rotation complémentaire du projectile . . . » 251

[illegible]

§ 10. Position définitive de la ligne de mire . . » 254

§ 11. Tir . . . . . » 256

§ 12. Dispersion de la balle . . . . . » 257

§ 13. Influence complémentaire du projectile . . . » 258

§ 14. Moyens d'accroître l'efficacité du tir des armes à feu » 263

TROISIÈME PARTIE — *Des divers genres de tir.*

§ 15. Genres de tir . . . . . » 267

§ 16. Tir de guerre . . . . . » 267

§ 17. Tir de chasse . . . . . » 269

§ 18. Tir à buts variables . . . . . » 270

QUATRIÈME PARTIE — *Du projectile après son émergence de l'âme.*

§ 19. Si le projectile a suivi au-dessus de sa direction primitive après sa sortie de la bouche de l'arme . » 273

§ 20. Si le projectile a pu se faire à une certaine distance de la bouche de l'arme et à la bouche même . » 275

§ 21. Si les valeurs des forces qui animent le projectile » 277

§ 22. Si la force vive dans le tir . . . . » 281

§ 23. Si la poudre humide est plus forte que la poudre sèche pag. 282

§ 24. Si le bourrage augmente les effets de la charge » 283

§ 25. Si l'on peut empêcher les projectiles creux d'éclater » 285

§ 26. Si les poudres avariées repoussent plus fortement que les poudres en bon état. . . . . » 287

§ 27. Si les effets de la charge croissent à mesure qu'on l'augmente . . . . . » 289

NOTE. *Discussion du principe sur lequel est fondée toute la théorie du pointage.*

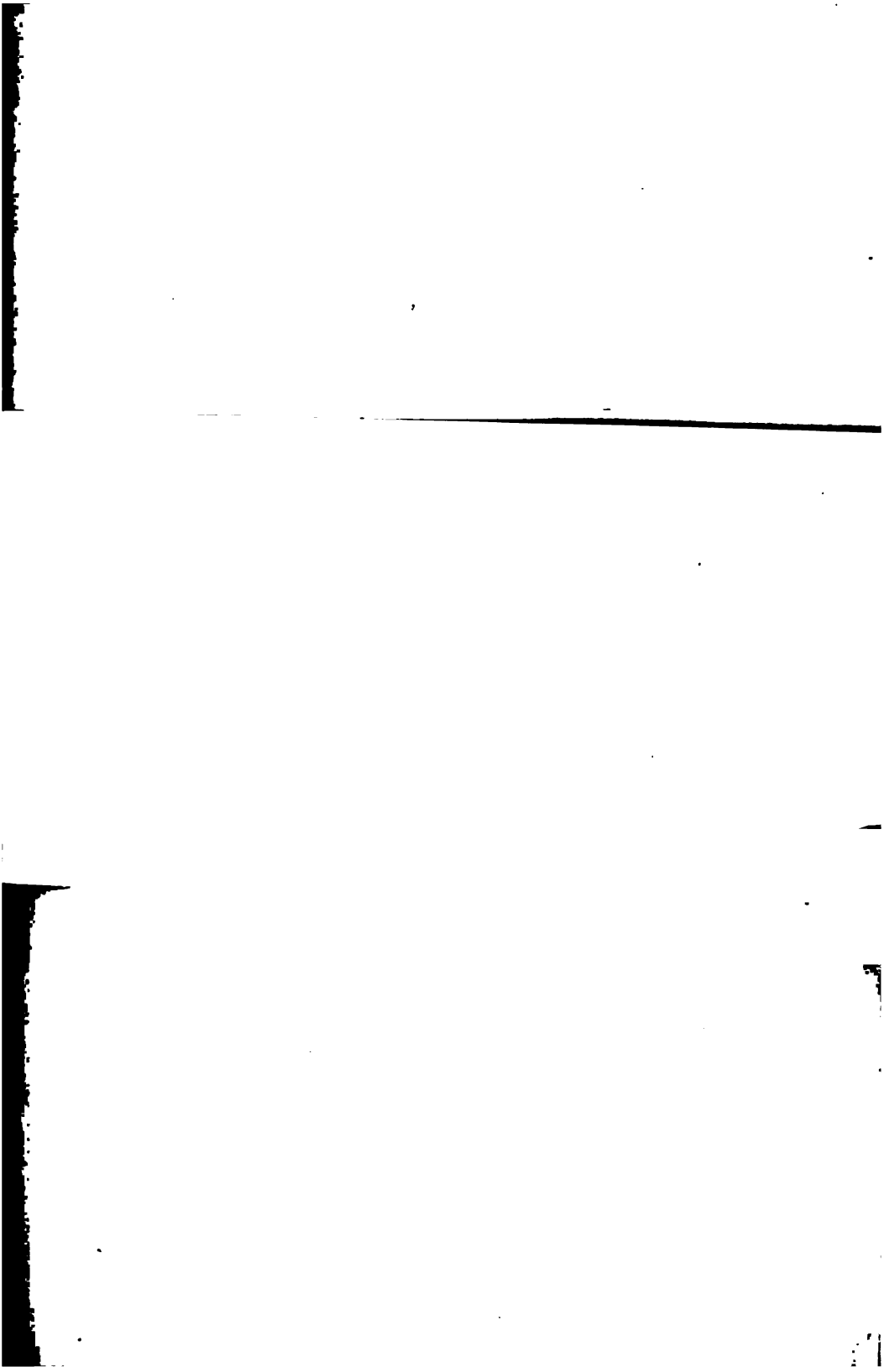
§ 28. Limites des erreurs que l'on commet en admettant le principe que l'abaissement d'un projectile sphérique au-dessous de la ligne de projection est indépendant de l'angle de projection. . . . . » 291

§ 29. Applications numériques au tir du fusil lisse d'infanterie et au canon lisse de 6 liv. de campagne . » 302

SUR LE VOLUME D'UNE EMBRASURE.

Note sur le volume d'une embrasure . . . pag. 317

Fin de la table des matières du tome deuxième.



ERRATA DU TOME I.

Page	150	*ligne*	11	*en remontant*	recticulées	*lisez*	réticulées.
»	168	»	3	»	$\left(1 = \frac{u_0}{r}\right)$	»	$\left(1 + \frac{u_0}{r}\right)$
»	198	»	8	»	$\sin \delta$	»	$\sin^2 \delta$.

PRIX : 8 francs.

3 2044 004 467 254